



UNIVERSITÀ DI PISA

Scuola di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea

Sviluppo di un criterio per sensorizzare una vela rigida che scelga automaticamente l'assetto aerodinamico di ottimo

Relatori

Prof. Giovanni Lombardi
Ing. Marco Maganzi

Candidati

Franco Grazio
Luca Emanuele Facchini

Anno Accademico 2014/2015

Abstract

Il presente lavoro nasce dall'interesse espresso dal cantiere navale italiano Perini Navi S.p.A di Viareggio, leader mondiale nella progettazione di yacht a vela di lusso, per la realizzazione della navigazione assistita. L'elaborato studia come permettere la regolazione automatica delle vele grazie all'utilizzo di un innovativo sensore di pressione *wireless autoalimentato* in via di sperimentazione presso l'Università di Pisa in collaborazione dell'azienda R.i.CO. S.r.l. L'interesse di Perini Navi è segnalato anche dall'accordo di *partnership* stabilito con l'ateneo pisano per la sponsorizzazione della barca a vela da regata Cherubina, progettata e costruita dal Team Vela degli studenti dell'Ateneo. Oggetto dello studio preliminare per la definizione del criterio attraverso cui definire la sensorizzazione della vela sarà la *wingsail* di tale imbarcazione, portando quindi all'elaborazione di una procedura applicabile in linea generale a qualsiasi vela rigida.

In particolare, grazie all'utilizzo del *software* di Fluidodinamica Computazionale *Ansys Fluent 14*, è stata caratterizzato il campo aerodinamico generato dalla *wingsail*, consentendo di valutare l'applicazione del metodo al caso specifico e definire le prestazioni tecniche richieste ai sensori di pressione nel campo di lavoro della barca. Sulla base dei dati ottenuti, infine, è stato svolto uno studio delle prestazioni della vela, mostrando come sia effettivamente possibile definire un processo di regolazione automatica dell'assetto della vela a partire dalle misure fornite da sensori di pressione opportunamente disposti sulla superficie della *wingsail*.

Il lavoro lascia facilmente intravedere possibili applicazioni del metodo alle barche dotate di vela rigida, quali i catamarani da competizione di *Coppa America*. Inoltre, l'assoluta generalità dei criteri definiti permette di credere ragionevolmente che sia possibile applicare lo stesso metodo alle *soft sail* degli yacht a vela.

Indice

Cap I. Introduzione	1
1.1 Design Nautico e Aeronautico	1
1.2 Strumenti	2
1.3 Obiettivi	3
 Cap II. La vela rigida	 5
2.1 Le origini	5
2.2 Aerodinamica della Vela	12
2.3 La vela tradizionale	17
2.4 La vela rigida	23
 Cap III. Sensori di pressione	 27
3.1 Misura della pressione	27
3.2 Trasduttori	28
3.3 Stato dell'arte	30
 Cap IV. Analisi CFD	 33
4.1 Geometria di riferimento	34
4.2 Generazione della <i>mesh</i>	38
4.3 Modello fisico-matematico	42
4.4 Solution Setup	45
4.5 Simulazioni	49
 Cap V. Risultati	 51
5.1 Caratterizzazione del flusso aerodinamico	51
5.2 Curva C_L - α	54
5.3 Polare	57
5.4 Stallo	59

5.5	Effetto del <i>flap</i>	63
5.6	Effetto dello svergolamento sullo stallo	79
5.7	Visualizzazioni del flusso	85
Cap VI. Analisi della sensorizzazione		95
6.1	Sensorizzazione del bordo d'attacco del <i>main</i>	96
6.2	Sensorizzazione del bordo d'attacco del <i>flap</i>	119
6.3	Sensorizzazione del bordo d'uscita del <i>main</i>	134
6.4	Sensorizzazione del bordo d'uscita del <i>flap</i>	143
6.5	Definizione della strumentazione della vela	150
Cap VII. Applicazione alla navigazione		165
7.1	Equilibrio e stabilità	165
7.2	Introduzione allo studio delle prestazioni della vela	170
7.3	Utilizzo della vela rigida sensorizzata per la navigazione	178
Cap VIII. Conclusioni		182

Indice delle Figure

2.1	Evoluzione della vela	6
2.2	Tipologie di velatura	8
2.3	Le vele di strallo	8
2.4	Tipologia di attrezzatura	9
2.5	Interazione tra fiocco e randa	16
2.6	Condizione di lavoro della <i>soft sail</i>	17
2.7	Effetto dell'albero	17
2.8	Filetti segnamento	19
2.9	Incidenza di un profilo	21
2.10	Effetto della curvatura sulla curva di portanza	22
2.11	Effetto della curvatura sulla polare	22
2.12	BMW Oracle	23
2.13	La vela rigida	23
2.14	Effetto dello spessore sulla curva di portanza	24
2.15	Confronto tra le prestazioni di <i>soft sail</i> e <i>wing sail</i>	24
3.1	Prototipo di sensore capacitivo	30
3.2	Effetto della precisione sull'errore	32
4.1	Profili della vela	34
4.2	Modello di vela di <i>Cherubina</i>	35
4.3	Parametri del modello CAD	36
4.4	Dominio di calcolo	37
4.5	Ambiente di lavoro <i>Ansys Workbench 15</i>	38
4.6	Importazione della geometria in ambiente <i>meshing</i>	39
4.7	<i>Sizing</i> della griglia di calcolo	40
4.8	Setup <i>Inflation Layer</i>	41
4.9	Setup modello di turbolenza	46
4.10	<i>Solution Methods</i>	48

5.1	<i>Velocity Magnitude</i>	52
5.2	<i>Velocity Vectors</i>	52
5.3	<i>Total Pressure</i>	53
5.4	<i>Pressure Coefficient</i>	53
5.5	Curva C_L - α	55
5.6	Convergenze	56
5.7	Polare	58
5.8	Approssimazione parabolica della polare	58
5.9	<i>Velocity Magnitude</i> e <i>Total Pressure</i> allo stallo	60
5.10	<i>Shear Stress</i> allo stallo	61
5.11	Effetto dello svergolamento sulla distribuzione di portanza	62
5.12	Distribuzione di portanza in apertura	63
5.13	Effetto della deflessione sulla curva C_L - α	64
5.14	Effetto della deflessione sulla curva C_L - α	64
5.15	Effetto della deflessione sull'incidenza di portanza nulla	65
5.16	Effetto della deflessione sulla polare	66
5.17	Effetto della deflessione sulla polare	66
5.18	<i>Shear Stress</i> allo stallo al variare della deflessione	69
5.19	<i>Velocity Magnitude</i> e <i>Total Pressure</i> allo stallo al variare della deflessione	71
5.20	Curva C_L - δ	73
5.21	<i>Shear Stress</i> allo stallo di <i>flap</i>	75
5.22	<i>Velocity Magnitude</i> allo stallo di <i>flap</i>	77
5.23	<i>Total Pressure</i> allo stallo di <i>flap</i>	78
5.24	Differenze tra i <i>nose</i> in apertura	79
5.25	Curva C_L - α con svergolamento	80
5.26	<i>Shear Stress</i> per lo stallo con svergolamento	81
5.27	<i>Velocity Magnitude</i> per lo stallo con svergolamento	82
5.28	<i>Total Pressure</i> per lo stallo con svergolamento	83
5.29	<i>Pathlines</i> in apertura per i diversi tipi di stallo	86
5.30	<i>Pathlines</i> dalle sezioni di riferimento	88
5.31	<i>Pathlines</i> dalle sezioni di riferimento	89
5.32	Stallo di elevata deflessione	91

5.33	Stallo di bassa deflessione	92
5.34	Stallo con svergolamento	93
5.35	Stallo di <i>flap</i>	94
6.1	Pannellizzazione profilo NACA 8510	97
6.2	Distribuzione di pressione sul profilo NACA 8510	97
6.3	Parabola interpolante su NACA 8510	98
6.4	Effetto spaziature misure sull'interpolazione	99
6.5	Spostamento del punto di ristagno sul <i>main</i> con l'incidenza – 1,9 m	101
6.6	Errore nella determinazione del punto di ristagno sul <i>main</i> – 1,9 m	102
6.7	Spostamento del punto di ristagno sul <i>main</i> con la deflessione – 1,9 m	104
6.8	Errore nella determinazione del punto di ristagno sul <i>main</i> – 1,9 m	104
6.9	Errore nella determinazione della velocità sul <i>main</i> – 1,9 m	106
6.10	Andamento del picco di aspirazione sul <i>main</i> con l'incidenza – 1,9 m	107
6.11	Andamento del picco di aspirazione sul <i>main</i> con la deflessione – 1,9 m	108
6.12	Spostamento del punto di ristagno sul <i>main</i> con l'incidenza – 5 m	109
6.13	Errore nella determinazione del punto di ristagno sul <i>main</i> – 5 m	110
6.14	Effetto della quota nella determinazione del punto di ristagno sul <i>main</i>	111
6.15	Errore nella determinazione della velocità sul <i>main</i> – 5 m	111
6.16	Effetto della quota nella determinazione della velocità sul <i>main</i>	112
6.17	Andamento del picco di aspirazione sul <i>main</i> con l'incidenza – 5 m	113
6.18	Esempio di letture fornibili dai sensori sul bordo d'attacco del <i>main</i>	115
6.19	Parabola interpolante le letture dei sensori sul bordo d'attacco del <i>main</i>	115
6.20	Contributi all'errore totale sul punto di ristagno <i>main</i>	118
6.21	Spostamento del punto di ristagno sul <i>flap</i> con l'incidenza – 1,9 m	120
6.22	Errore nella determinazione del punto di ristagno sul <i>flap</i> – 1,9 m	121
6.23	Spostamento del punto di ristagno sul <i>flap</i> con la deflessione – 1,9 m	122
6.24	Errore nella determinazione del punto di ristagno sul <i>flap</i> – 1,9 m	123
6.25	Errore nella determinazione della velocità sul <i>flap</i> – 1,9 m	124
6.26	Andamento del picco di aspirazione sul <i>flap</i> con l'incidenza – 1,9 m	125
6.27	Spostamento del punto di ristagno sul <i>flap</i> con l'incidenza – 5 m	126
6.28	Errore nella determinazione del punto di ristagno sul <i>flap</i> – 5 m	127
6.29	Effetto della quota nella determinazione del punto di ristagno sul <i>flap</i>	128
6.30	Errore nella determinazione della velocità sul <i>flap</i> – 5 m	128

6.31	Effetto della quota nella determinazione della velocità sul <i>flap</i>	129
6.32	Andamento del picco di aspirazione sul <i>flap</i> con l'incidenza – 5 m	130
6.33	Esempio di letture fornibili dai sensori sul bordo d'attacco del <i>flap</i>	131
6.34	Parabola interpolante le letture dei sensori sul bordo d'attacco del <i>flap</i>	132
6.35	Contributi all'errore totale sul punto di ristagno sul <i>flap</i>	133
6.36	Coefficiente di pressione sul dorso del <i>main</i> – 1,9 m	135
6.37	Coefficiente di pressione sul dorso del <i>main</i> – 5 m	135
6.38	Effetto della posizione sul dorso del <i>main</i>	137
6.39	Effetto dell'ampiezza strumentata sul dorso del <i>main</i>	138
6.40	Gradiente di pressione sul dorso del <i>main</i> con l'incidenza	140
6.41	Coefficiente di pressione sul dorso del <i>main</i> con 3° di deflessione	141
6.42	Coefficiente di pressione sul dorso del <i>main</i> con 31° di deflessione	141
6.43	Coefficiente di pressione sul dorso del <i>flap</i> – 1,9 m	143
6.44	Coefficiente di pressione sul dorso del <i>flap</i> – 5 m	144
6.45	Effetto della posizione sul dorso del <i>flap</i>	145
6.46	Effetto dell'ampiezza strumentata sul dorso del <i>flap</i>	146
6.47	Gradiente di pressione sul dorso del <i>flap</i> con l'incidenza	147
6.48	Coefficiente di pressione sul dorso del <i>flap</i> con 3° di deflessione	148
6.49	Coefficiente di pressione sul dorso del <i>flap</i> con 31° di deflessione	148
6.50	Effetto della precisione sul passo ottimo	151
6.51	Passo ottimo sul bordo d'attacco del <i>main</i> – 5 m/s	152
6.52	Errore sul bordo d'attacco del <i>main</i> – 10 m/s	153
6.53	Effetto della quota sull'errore sul <i>main</i> – 5 m	154
6.54	Passo ottimo sul bordo d'attacco del <i>flap</i> – 5 m/s	158
6.55	Effetto della quota sull'errore sul <i>flap</i> – 5 m	159
7.1	Vento apparente sulla barca	166
7.2	Composizione delle velocità sulla vela con la quota	166
7.3	Andature di navigazione	166
7.4	Forze aerodinamiche sulla vela	167
7.5	Forze idrodinamiche sulla barca	168
7.6	Equilibrio in rollio	169
7.7	Momento raddrizzante	169
7.8	Effetto del limite sulla forza sbandante	171

7.9	Effetto dell'andatura sulla forza laterale	172
7.10	Effetto dell'andatura sulla <i>driving force</i>	172
7.11	Effetto dell'andatura sulla spinta massima	173
7.12	Spinta massima e incidenza di ottimo	174
7.13	Effetto della velocità su spinta massima e incidenza di ottimo	175
7.14	Effetto della deflessione su spinta massima e incidenza di ottimo	177
7.15	Automatizzazione della scelta della configurazione di ottimo	179

Indice delle Tabelle

3.1	Range di lavoro dei sensori	31
4.1	<i>Named Selections</i>	42
4.2	Condizioni al contorno	47
4.3	Simulazioni effettuate	50
5.1	Coefficienti curva C_L - α	54
5.2	Coefficienti polare	57
5.3	Parametri della vela con 19° di deflessione	59
5.4	Effetto della deflessione sulla curva di portanza	65
5.5	Effetto della deflessione sulla polare	67
6.1	Errori dovuti all'interpolazione NACA 8510	99
6.2	Errori dovuti all'interpolazione NACA 8510	100
6.3	Errore nella determinazione del punto di ristagno sul <i>main</i> – 1,9 m	103
6.4	Errore nella determinazione del punto di ristagno sul <i>main</i> – 1,9 m	105
6.5	Errore nella determinazione della velocità sul <i>main</i> – 1,9 m	107
6.6	Errore nella determinazione del punto di ristagno sul <i>main</i> – 5 m	110
6.7	Errore nella determinazione della velocità sul <i>main</i> – 5 m	112
6.8	Errore nella determinazione del punto di ristagno sul <i>flap</i> – 1,9 m	111
6.9	Errore nella determinazione del punto di ristagno sul <i>flap</i> – 1,9 m	113
6.10	Errore nella determinazione della velocità sul <i>flap</i> – 1,9 m	115
6.11	Errore nella determinazione del punto di ristagno sul <i>flap</i> – 5 m	117
6.12	Errore nella determinazione della velocità sul <i>flap</i> – 5 m	119
6.13	Requisiti dei sensori e stima degli errori sul bordo d'attacco del <i>main</i>	155
6.14	Stazioni in altezza sul bordo d'attacco del <i>main</i>	156
6.15	Numero di sensori sul bordo d'attacco del <i>main</i> alle varie altezze	157
6.16	Requisiti dei sensori e stima degli errori sul bordo d'attacco del <i>flap</i>	160
6.17	Numero di sensori sul bordo d'attacco del <i>flap</i> alle varie altezze	161
6.18	Requisiti dei sensori per il bordo d'uscita del <i>main</i>	162
6.19	Requisiti dei sensori per il bordo d'uscita del <i>flap</i>	163

Capitolo I

Introduzione

La vela rigida, o *wingsail*, è una struttura aerodinamica dalla curvatura variabile montata su alcune imbarcazioni in luogo della vela tradizionale (*soft sail*). Essa è analoga all'ala di un aereo, ma progettata in modo da fornire portanza da entrambi i lati e consentire il bordeggio.

1.1 Design Nautico e Aeronautico

Accade spesso che i risultati degli studi svolti sulla vela rigida a lungo non siano pubblicati e divulgati nella comunità scientifica, giacché patrimonio di aziende o team concorrenti, che non hanno interesse a diffondere i segreti di una soluzione moderna e di una tecnologia recente. Pertanto, i dati disponibili in letteratura non sono oggi ancora consistenti, specialmente se confrontati con la vasta quantità di informazioni tratte dall'analisi relativa alle ali degli aerei.

Queste, tuttavia, operano in condizioni certamente diverse e per obiettivi differenti da quelli di una vela: l'ala di un aereo è disegnata per sviluppare la minima resistenza a una data portanza, mentre una vela rigida deve generare massima spinta per un dato momento sbandante ammissibile e, nondimeno, deve poter operare su entrambe le mura. Ali e vele sono anche caratterizzate da numeri di Reynolds che differiscono generalmente di un ordine di grandezza e valgono, indicativamente, 10 milioni e 1 milione rispettivamente. Infine, diversamente dall'aereo, che è investito da un flusso a bassa turbolenza di velocità e incidenza costanti, lo

yacht è condizionato dallo strato limite terrestre, e sottoposto a una distribuzione di vento apparente che varia di angolo e intensità in l'altezza. In un flusso ad alta turbolenza un'ala che lavora a coefficienti di portanza estremamente elevati può non essere la scelta ottimale, e rischia di andare incontro allo stallo in ragione della fluttuazione dinamica del vento apparente; un profilo caratterizzato da stallo improvviso, a maggior ragione, risulterebbe più sensibile a questo tipo di problema.

In merito alle forze aerodinamiche generate, rimane comunque evidente la stretta analogia tra il ruolo svolto dalle vele, che forniscono la forza propulsiva necessaria al moto della barca, e la superficie alare di un aereo, che sviluppa portanza. L'affinità tra mondo della vela e ambiente aeronautico permette di utilizzare stesse metodologie e strumenti di calcolo per caratterizzarne il comportamento.

1.2 Strumenti

L'industria nautica è un mondo molto competitivo, e la *fluidodinamica computazionale* (CFD) ha conosciuto un utilizzo crescente come diretto risultato della richiesta continua di nuovi prodotti e innovazioni. La CFD, infatti, consente una veloce predizione delle azioni agenti su una superficie, rendendo meno incalzante il bisogno di costose sperimentazioni in galleria del vento. Benché la CFD offra un enorme potenziale, essa non è esente da limiti. La discretizzazione del continuo, infatti, introduce errori numerici che, tuttavia, possono essere minimizzati alle spese di un ulteriore costo computazionale, in termini di tempo e denaro. Inoltre, la CFD può presentare problemi con i modelli numerici di turbolenza di risoluzione delle *Reynolds Average Navier-Stokes Equations* (RANS), che ancora richiedono il confronto con i dati sperimentali per la validazione dei risultati numerici ottenuti.

Nel presente lavoro, in particolare, per il calcolo dello strato limite ci si servirà del modello di turbolenza $k-\epsilon$ unitamente alle *leggi di parete*, relazioni semi-empiriche che assumono il regime del flusso interamente turbolento. È importante evidenziare che, specialmente per flussi a basso numero di Reynolds, una porzione significativa dello strato limite potrebbe trovarsi in regime laminare; in tal caso, tale predizione può *fallire* e l'accordo con i dati sperimentali mancare, specialmente nella determinazione del coefficiente di resistenza rispetto a quello di portanza. Tuttavia, la presenza del moto ondosso, il beccheggio, l'elevata turbolenza e la

fluttuazione dinamica del vento indeboliscono l'ipotesi laminare e, nondimeno, è giusto considerare come il tipo di analisi svolta richieda una caratterizzazione del flusso che è bene sia coerente a se stessa nel corso dello studio senza, tuttavia, aver bisogno di rappresentare e descrivere strettamente il caso *reale*.

La corretta modellazione dello strato limite e la predizione della transizione restano temi centrali dell'analisi CFD. In ogni caso, il modello di turbolenza $k-\epsilon$ e le *Non-Equilibrium Wall Functions* sembrano adatti alla caratterizzazione del flusso attorno a una vela rigida, se l'utilizzo di un numero elevato di *prism layer* garantisce che ciascuna zona abbia un numero elevato di celle che risolvano lo strato limite.¹

I software di cui ci serve per lo studio sono: ANSYS Workbench V15 (creazione della mesh), ANSYS Fluent V14 (svolgimento delle simulazioni), CATIA V5 R20 (gestione della geometria), Microsoft Excel e MATLAB (analisi dei dati).

1.3 Obiettivi

Il presente lavoro nasce dall'interesse espresso dal cantiere navale italiano Perini Navi S.p.A. di Viareggio, leader mondiale nella progettazione e produzione di yacht a vela di lusso, per l'analisi di un innovativo *sensore di pressione piezoelettrico wireless autoalimentato*, prodotto ancora come prototipo dall'azienda R.i.CO. S.r.l. in collaborazione con l'Università di Pisa. La realizzazione del sensore non è ancora perfezionata, e negli ultimi mesi ha conosciuto un interessamento prevalente riguardo all'aspetto della *sensibilità*. La specializzazione del sensore al campo di applicazione nautico e l'opportuna strumentazione della vela riuscirebbero, quindi, a consentire la caratterizzazione del flusso e la scelta automatica della configurazione aerodinamica di ottimo. Tale potenzialità risponde alle esigenze di un mercato di lusso in cui l'armatore non si occupa in prima persona di governare l'imbarcazione, ma gode semplicemente del piacere della navigazione. Un'innovazione di questo tipo è quindi coerente con le richieste del mercato.

L'interesse di Perini Navi è segnalato anche dall'accordo di *partnership* stabilito con l'Università di Pisa per la sponsorizzazione della barca a vela progettata e costruita dal *Team Cherubina* degli

¹ F. J. L. Gamboa, *Numerical Analysis of wingsail aerodynamic characteristics using Computational Fluid Dynamics*, 2010 IST

studenti dell'Ateneo. Nel corso del presente lavoro, sarà presa come oggetto di studio la vela rigida di tale imbarcazione: essa sarà il modello analizzato al fine di stabilire il criterio razionale secondo cui strumentare una *wingsail* per permettere la caratterizzazione del flusso aerodinamico da essa generato a partire dalle misure fornite dai sensori di pressione che la muniscono.

Perini Navi, grazie all'invenzione dei *reel captive winch*, sistema di verricelli automatizzati controllati elettronicamente, è stata la prima azienda al mondo capace di produrre barche di grandi dimensioni gestibili da un equipaggio ridotto, e crede fortemente in questo studio, in linea teorica capace di permettere il controllo automatico dell'imbarcazione, e di far conoscere all'azienda un'altra storica svolta.

Capitolo II

La vela rigida

La barca a vela è un mezzo di trasporto che ricava il proprio moto dalle forze derivanti dall'interazione con acqua e aria. In particolare, il moto della barca è influenzato principalmente dalle forze aerodinamiche generate dal vento che investe le vele, che da esso recuperano energia e la trasformano in movimento, e dalle forze idrodinamiche originate dal moto relativo tra la parte immersa dello scafo e l'acqua.

2.1 Le origini

La navigazione

Le origini della costruzione navale risalgono a prima della storia scritta. Fin dall'antichità l'uomo ha avvertito la necessità di spingersi in mare per il trasporto, la guerra o la pesca. La nascita della barca mossa dai venti può ricercarsi in Cina, in Mesopotamia e nell'Antico Egitto, dove esistono prove della navigazione lungo i grandi corsi d'acqua che bagnano queste terre. Sul Nilo si costruirono imbarcazioni a vela già in tempi predinastici, prima del 3000 a.C. Il vento serviva agli antichi naviganti solo se spirava nella direzione favorevole. Quando esso soffiava in senso contrario, o anche al *traverso*, l'imbarcazione doveva muoversi a remi oppure restare ormeggiata in qualche braccio di fiume in attesa di venti favorevoli, con le vele ammainate e, in caso di tempesta, anche con l'albero abbattuto. Su coste esposte a venti

costanti, come gli *alisei*, o stagionali, come i *monsoni*, non era possibile sperare in un cambiamento di direzione.²

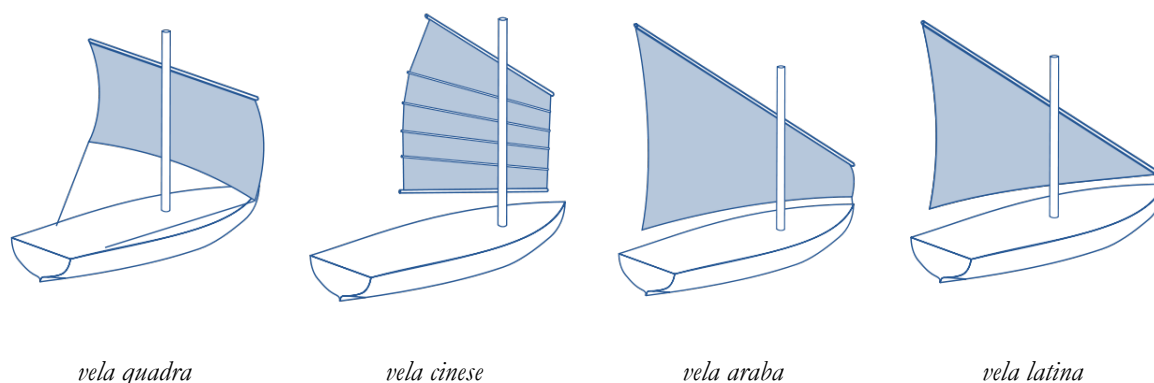


Fig. 2. 1

Dalla necessità di trovare un mezzo che sfruttasse i venti al *traverso* nacque intorno al 100 d.C. in Medio Oriente la vela latina, la cui audace concezione contribuì enormemente alla navigazione non strettamente vincolata alla direzione del vento. La vela latina, prima intuizione dell'aerodinamica, era quasi triangolare e formava con la direzione del vento un angolo variabile a piacere. Propria del mondo arabo, si diffuse nel Mediterraneo durante il VII secolo e nel secolo XV, periodo delle grandi scoperte geografiche, sarebbe poi stata largamente utilizzata unitamente alla più antica vela quadra. Nel frattempo, la vela della giunca cinese non era capita dagli europei e perciò non si diffuse in altre parti del mondo, pur essendo meravigliosa, nettamente superiore alla vela latina in termini di capacità di sfruttare la propulsione del vento in ogni direzione. Se in Cina fossero riusciti a diminuire lo scarroccio dato dai loro grossolani scafi, si sarebbe già potuta praticare la navigazione di *bolina* e forse anche il *bordeggio*.

Insieme alla diffusione della vela latina nascevano in Europa imbarcazioni dalle forme più affinate. I vichinghi rivolsero i loro studi al peso e alle forme dello scafo, che raggiunse un'efficienza prima inimmaginabile. Così, i vichinghi tentavano nei mari del Settentrione quello che i polinesiani raggiungevano nel Pacifico. I Vichinghi seppero costruire scafi magnificamente adatti a risalire il vento, ma la loro unica vela quadra era insufficiente allo scopo. Viceversa, le vele latine potevano dare prestazioni migliori di quelle permesse dal punto

² <http://www.rottesostenibili.it/andarxmare/BoatSailRig1.htm>, *Barche, vele, attrezzature. Riflessioni per una storia sostenibile*

di vista idrodinamico dai tozzi scafi su cui erano issate. Solo all'inizio del 1900 lo *yacht* sarebbe riuscito a rappresentare la mirabile sintesi di scafi orzieri, progettati per *bolinare*, e di vele che stringono il vento.

L'albero unico dominò la navigazione a vela per millenni e solo nel XIV secolo si diffusero alberature a due alberi, sperimentate per la prima volta dai fenici già intorno al 100 a.C. Quindi, verso il 1400 d.C. si impose nella navigazione d'alto mare il bastimento a tre alberi. In ogni caso, le origini della navigazione a vela moderna risalgono solo al XVII secolo agli *jaght* olandesi, velieri agili e veloci costruiti per la lotta al contrabbando e alla pirateria. Interessanti e divertenti da condurre, essi finirono per essere usati per fini sportivi. In quel periodo, il sovrano inglese Carlo II portava in Inghilterra uno di questi esemplari, ricevuto in regalo, favorendo la diffusione della navigazione sportiva. Nel frattempo, la parola di origine olandese "*jaght*" veniva anglicizzata nel termine moderno "*yacht*".³ Fu comunque verso la metà dell'800 che per la prima volta furono costruiti velieri disegnati specificatamente come *yacht*.

L'evoluzione seguente proseguì nelle due direzioni che potevano portare a vantaggi economici: maggiori dimensioni e maggior velocità. Intorno al 1830 nacque, sotto tale impulso, la più elegante, veloce e redditizia costruzione che la marina mercantile mondiale avesse mai visto: il *clipper*, primo veliero costruito sotto il segno della velocità e non secondo i criteri di volume e stabilità. La costruzione a vela, tuttavia, restava sempre subordinata alle possibilità che il vento le concedeva, mentre la macchina a vapore, che conosceva una grande diffusione intorno al 1870, la svincolava da esso. Per tal motivo, la più audace ed efficiente realizzazione della costruzione navale ebbe la sua condanna a morte nel preciso istante del suo più brillante sviluppo. Dal Novecento, grazie alla sintesi di vele e scafi orzieri, l'andatura di *bolina* assume un'importanza preminente e condiziona forma e distribuzione della velatura; oggi la maggior parte del tempo di navigazione è trascorsa in tale andatura e, spesso, la capacità di stringere il vento è concepita come misura dell'efficienza della velatura.

L'attrezzatura

Le barche si distinguono per l'attrezzatura velica con la quale sono armate. Solitamente è possibile riconoscere una vela principale detta vela *maestra* o *randa*, e un certo numero di vele

³ Andrea Fani, *Studio parametrico delle prestazioni di un multiscafo da regata*

addizionali di superficie generalmente minore.

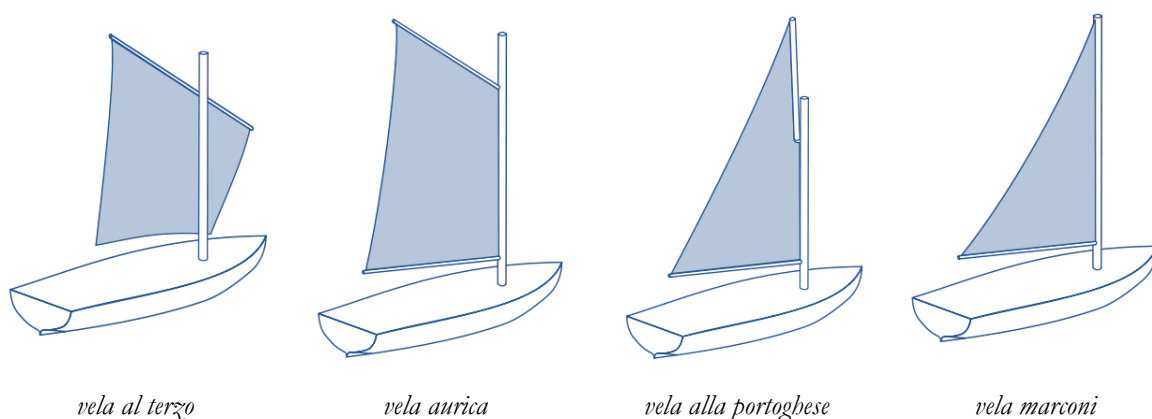


Fig. 2. 2

La *vela latina* è poco diffusa sugli yacht, e in misura maggiore nel mondo arabo, su pescherecci e imbarcazioni costiere. Essa possiede un buon rendimento velico, lasciando come inconveniente principale la complessa manovra necessaria per virare di bordo. La *vela al terzo* è un tipo di vela adatto a piccole imbarcazioni; essa è di grande semplicità, poiché può essere impiegata senza boma, lasciando inferito unicamente il lato superiore. Per meglio stringere il vento, nel 1600 si svilupparono la *velatura aurica* e le derive esterne. La vela maestra aurica per efficienza si dimostrò nettamente superiore a tutte quelle che l'avevano preceduta, affermando le sue spiccate attitudini alla bolina non appena gli scafi furono adeguati. La *vela alla portoghese* è una variante della maestra aurica, e si differenzia per la presenza del picco verticale. A cavallo del 1900 compare la *vela bermudiana o marconi*, che resta il tipo di randa attualmente più diffuso, con un rendimento di bolina superiore rispetto alla aurica; essa richiede l'utilizzo di alberi cavi alti, la cui costruzione è stata resa possibile grazie ai moderni collanti e all'estrusione dei metalli.

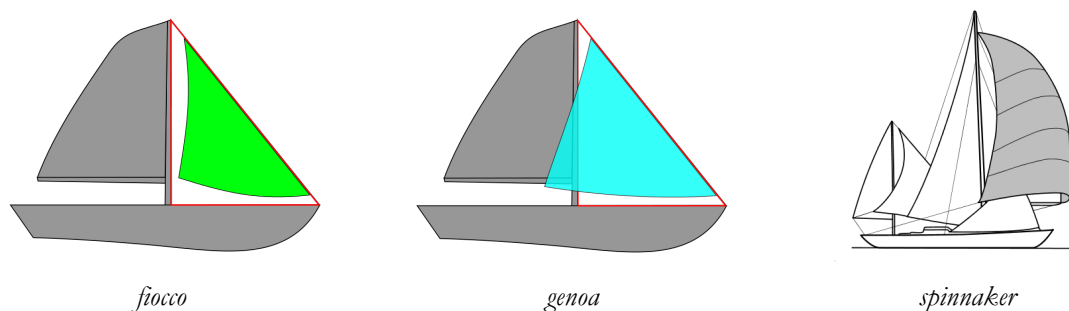


Fig. 2. 3

Le più comuni vele di strallo, poste davanti all'albero in zona prodiera, sono *fiocco*, *genoa* e *spinnaker*. La questione della sovrapposizione della vela di prua sulla vela maestra è stata oggetto di lungo dibattito, ma oggi la maggiore efficienza del *genoa* rispetto al *fiocco* è universalmente riconosciuta. Lo *spinnaker* è la vela usata per sfruttare i venti larghi, provenienti dai settori poppieri. Essa ha elevato notevolmente l'efficienza della navigazione in poppa, andatura in cui già le vele quadre avevano dato dimostrazione di grande rendimento ma in cui le auriche, latina compresa, non avevano mai brillato.



Fig. 2. 4

Oggi, uno dei pochi codici di classificazione tipologica delle imbarcazioni universalmente accettato consiste nell'analisi del tipo di armamento velico, secondo cui si distinguono i diversi tipi di velieri. Si riconoscono così lo *sloop* americano e il *cutter* inglese tra le imbarcazioni monoalbero, a uno e due fiocchi rispettivamente; *yawl* e *ketch* tra le imbarcazioni a due alberi in cui la maestra è a prua, e la mezzana rispettivamente dietro e avanti l'asse del timone, a loro volta diverse dalle golette (*schooner*), velieri a due alberi gemelli o con la maestra a poppa.⁴

Lo scafo

L'unità di misura di una nave è la *stazza*, e tasse sul tonnellaggio di stazza furono applicate già nel XIV secolo. Nei secoli a venire, grande influenza nella costruzione navale fu data delle formule che regolavano in quel momento storico la misura della stazza di un'imbarcazione. È arduo affermare che la matematica ha creato lo *yacht*. È stato il gusto di ogni epoca che ha fuso insieme yacht e matematica secondo le regole dettate da moda e tradizione.⁵

⁴ Massimo Musio-Sale, *Yacht design. Dal concept alla rappresentazione*, 2009 Tecniche Nuove, Milano

⁵ Roberto Sciarrelli, *Lo Yacht*, 1970 Mursia, Milano

Le barche olandesi, si è visto, ebbero grande importanza sulla nascita dello *yachting*, pur rappresentando un capitolo a parte nella storia della barca da diporto; caratteristica degli scafi olandesi era la grande pienezza delle forme, specialmente quelle di prua, e il basso pescaggio, imposto dall'esigenza di percorrere i canali navigabili del paese.

Il *cutter*, storico veliero inglese a un albero nato nella seconda metà del XVIII secolo, era una barca dalle linee molto fini, basso sull'acqua, strettissimo, e con una quantità di vela enorme; la prora praticamente a piombo (*plumb-stemmer*), la prua stretta e affilata come un coltello, tale da potersi tuffare molto facilmente e assumere un'inerzia contrastante il naturale movimento del mare (dato il poco aumento di spinta in prora e il grande peso dell'attrezzatura). La possibilità di sistemare la zavorra molto vicino alla chiglia permise di spostare il centro di gravità in basso e portare vele immense: l'equilibrio era affidato a un'enorme quantità di zavorra, che raggiunse percentuali di peso, rispetto a quello totale dello scafo, del 70%, dando a questi stretti *cutter* inglesi il nome di *plank on edge*. Ciò accadde a maggior ragione verso il 1880, con il potentissimo ritrovato della zavorra esterna, strato di piombo fuso intorno allo scafo. Tuttavia, al progressivo e sempre più esasperato aumento della zavorra, adottato per tenere su sempre più vela fino ai limiti del tecnicamente possibile, non poteva corrispondere un grande aumento della velocità massima, data la grande energia spesa nella formazione di onde dovuta al dislocamento.

Mentre in Inghilterra prevalevano le forme sottili del *cutter*, già dal periodo coloniale in America si usava lo *sloop*, piccola nave a un albero, di grande capacità, forme piene, grande dislocamento, larghezza e estesa superficie velica. Essa era adatta a viaggi molto lunghi, viste le sue ottime doti di stabilità di forma, tenuta di mare e velocità. Il suo profilo seguiva la semplice regola americana per la velocità: *broad and shallow*, largo e di poco pescaggio. Per gli yacht del XIX secolo, la tecnica preferita dai costruttori americani non consisteva nel tracciare i profili tramite *disegni*, ma ricavare invece le linee del *mezzo-modello*, la cui forma era dettata dall'esperienza e dal senso della forma di chi faceva il modello (*the rule of the thumb*).

Lo *sloop* americano era favorito dal vento leggero e l'acqua calma, il *cutter* da vento forte e mare in prua. A lungo il tentativo intrapreso da molti costruttori è stato quello di concepire un'imbarcazione capace di esprimere le sue qualità in tutte e tre le caratteristiche fondamentali di navigazione: velocità, tenuta di mare e maneggevolezza. I tratti tipici delle due scuole, inglese e americana, furono in seguito coniugati in modi e misure differenti per dare frutti diversi, come lo storico *schooner* America, uno yacht di leggero dislocamento che nel profilo era

americano (grande stabilità di forma, larghezza, basso pescaggio) ma come stellatura e finezza dei rapporti superava perfino gli *yacht* inglesi. La finezza delle linee, anche all'uscita a poppa non era cosa facile da ottenere con scafi larghi, e la grande stabilità di forma permetteva un forte sviluppo della superficie velica. Si noti che l'eccesso di vela, o meglio, la scarsità di zavorra in proporzione alla vela, come anche la forma poco stabile di uno scafo, sono fattori che possono rendere una barca pericolosa, incline a rovesciarsi e, perciò, del tutto inadatta a portare vela con vento forte.

Uno scafo che forma delle onde cammina alla loro stessa velocità, con la prima cresta nei pressi della prua, e la seconda poco più indietro a una posizione fissa con la velocità, che può arrivare a coincidere con la fine dello scafo solo alla velocità massima (data dalla *formula di William Froude*). Solo un'imbarcazione planante riesce a liberarsi del sistema di onde che ha creato e stare su una sola cresta. La forma di minima resistenza d'onda a una data velocità sarà quella con la parte gonfia corrispondente alla zona cava dell'onda e con la parte sottile corrispondente alle creste. Pertanto, un buono scafo per basse velocità avrà la sezione massima abbastanza a prora e sarà fatto "come un pesce", come nel caso delle barche a remi, degli antichi velieri mercantili e dei vascelli da guerra del '700. Invece, lo yacht da crociera, la barca da regata per venti leggeri, o la nave che naviga alla velocità economica avranno volumi di carena distribuiti pressoché simmetricamente. Con poppa sempre più gonfia e specchio sempre più tronco saranno lo yacht da regata da vento forte, la deriva planante e il motoscafo.

Vi sono due possibilità di diminuire il volume dello scafo verso un'estremità: facendola sempre più stretta e profonda (a punta), oppure rendendola sempre più piatta e portandola in alto fino a farla uscire dall'acqua. I popoli mediterranei e scandinavi hanno sempre usato prora e poppa appuntite, gli inglesi e gli americani la prora appuntita con la poppa piatta, e viceversa gli olandesi. Gli scafi da bassa velocità, come le galere, avevano la poppa appuntita del tipo mediterraneo e scandinavo, e sfilavano bene nell'acqua senza "trascinarla con sé". La barca a vela ha a disposizione potenze superiori, quindi naviga su un'onda più lunga, con la poppa che tende a cadere nel cavo, e da ciò la necessità della poppa piatta, con grande specchio e lungo slancio. Per una barca più veloce possibile si dovrebbero fare piatte sia poppa che prora, ma la prua piatta non sarebbe ammissibile per una barca che deve tenere il mare.

In fin dei conti, lo scafo ideale in tutte le condizioni non esiste. Lo scafo migliore è quello in cui è meglio realizzato il tema che era stato proposto dall'architetto e, a seconda dei requisiti che più si vogliono esaltati, saranno diverse la forma e le dimensioni.

2.2 Aerodinamica della vela

Caratterizzazione del flusso

Se si considerano le leggi di conservazione di massa, di quantità di moto (formulazione della seconda legge di Newton) e di energia di un fluido di cui si trascurano gli effetti della viscosità, si ottengono le *equazioni di Eulero*. Includendo gli effetti della viscosità, invece, si ricavano le più complete e complesse *equazioni di Navier-Stokes*. In ogni caso, per Mach contenuti il flusso può essere considerato *incomprimibile*, di densità quindi costante. In questo caso, l'equazione di conservazione dell'energia è disaccoppiata dal sistema, e quella di conservazione della massa mostra che il campo di velocità è solenoidale, cioè a divergenza nulla. La vorticità può essere generata solo ai confini (*boundaries*) del corpo immerso nel flusso ed è propagata da un termine *convettivo* e uno *diffusivo*, i quali la rivelano confinata al 99% in una stretta zona prossima al corpo, detta *strato limite*. Lo spessore locale dello strato limite aumenta al calare del Reynolds locale, come avviene quando cala la velocità del flusso. All'interno dello strato limite Prandtl ha mostrato come semplificare l'equazione di conservazione della quantità di moto dal confronto degli ordini di grandezza. Si osserva che la pressione è *sovraimposta* allo strato limite: ciò significa che la pressione agente sul corpo è uguale a quella agente sullo strato limite.

Condizione necessaria per la separazione del flusso è la presenza di un gradiente avverso di pressione (aumento di pressione nella direzione del flusso). Tuttavia, nell'ipotesi in cui il corpo immerso sia affusolato e l'angolo di attacco contenuto si parla di *corpo aerodinamico* e, in questo caso, il gradiente avverso di pressione non è sufficiente a dare la separazione del flusso.

Al di fuori dello strato limite il campo di velocità è *irrotazionale* (a rotore nullo), ed è quindi esprimibile come gradiente di una funzione scalare, detta *potenziale*. Il flusso incomprimibile e irrotazionale è detto *potenziale* e, in tal caso, la legge di conservazione della massa si riduce all'*equazione di Laplace*, e quella di quantità di moto, se il flusso è anche stazionario, alla *legge di Bernoulli*. Nel flusso potenziale l'effetto della viscosità è assente. In ambito nautico tale ipotesi è verificata: infatti, al di fuori dello strato limite il flusso è irrotazionale e, essendo la velocità di navigazione contenuta, il fluido può essere considerato incomprimibile.

Nello strato limite l'anticipazione della transizione da regime *laminare* a *turbolento* può avere un effetto benefico agli elevati angoli di attacco, come succede anche per i *corpi tozzi*, quali palline da golf o palloni da calcio. Infatti il regime turbolento, più energetico, ritarda la separazione.

La transizione può essere favorita e anticipata aumentando il numero di Reynolds e la rugosità superficiale. Negli altri casi un flusso *laminare* risulterebbe preferibile, perché in grado di garantire minore resistenza d'attrito: infatti, il suo profilo di velocità alla superficie è più dolce e, pertanto, l'azione tangenziale minore. La resistenza d'attrito, dominante nei corpi aerodinamici rispetto a quella di pressione (o di scia, di forma), può essere stimata dall'analogia con la lastra piana commettendo un errore indicativo del 3-4%.⁶

Generazione della portanza

La *legge di Bernoulli*, conseguenza dalla legge di conservazione della quantità di moto, lega la pressione del fluido alla sua velocità locale, mostrando come al variare dell'una si manifesti una variazione dell'altra (di solito, infatti, essa è enunciata per flusso orizzontale, vale a dire elevazione costante). L'integrazione della distribuzione di pressione sulla superficie del corpo determina la forza aerodinamica su di esso, le cui componenti nella direzione perpendicolare e parallela alla direzione del flusso a monte sono dette *portanza* e *resistenza*. Allo stesso modo, anche l'integrazione della distribuzione di velocità attorno al corpo determina le forze aerodinamiche: l'integrazione della variazione di velocità intorno al corpo produce una variazione nella direzione del flusso aerodinamico che, per la *Terza Legge di Newton*, dà una forza aerodinamica di *reazione* sul corpo. Quindi, sia integrando gli effetti della pressione sia quelli della velocità si ottengono le forze aerodinamiche sul corpo.

Tuttavia, la spiegazione basata sulle forze di repulsione esercitate dal flusso d'aria spinto verso il basso sembra più completa e facile da comprendere, e anche maggiormente legata ai principi base della meccanica rispetto a quella che si serve della *legge di Bernoulli* che resta, invece, una spiegazione incompleta e quindi sconveniente se non si richiama il concetto di *circolazione* (circuitazione di velocità). Quest'ultima, infatti, assume come evidenza la concentrazione delle linee di corrente sulla parte superiore del profilo, che è indice di maggiori velocità, le quali comportano a loro volta (per la *legge di Bernoulli*) minori pressioni. Viceversa accade sul ventre, determinando infine sul profilo una forza complessiva verso l'alto.

Il bordo d'uscita dev'essere affilato per permettere quel determinato andamento del flusso, definito *condizione di Kutta*, che si concretizza nel distacco di un vortice al bordo d'uscita. Ogni

⁶ Giovanni Lombardi, *Appunti tratti dalle lezioni del corso di Aerodinamica degli Aeromobili*

volta che un profilo genera portanza, il suo bordo d'uscita deve essere inclinato rispetto al flusso a monte. Infatti, all'emissione del vortice nella scia si accompagna, per conservazione della vorticità globale, inizialmente nulla, la generazione di circolazione, o vorticità, intorno al corpo, che determina un aumento di velocità sul dorso e una diminuzione sul ventre, e viceversa per la pressione; la *formula di Kutta-Joukowski* mostra che la presenza di tale circolazione determina sul corpo un'azione portante non nulla.

Analogamente a *Bernoulli*, tramite *Newton* si parla della forza di repulsione, la stessa che tiene su un elicottero quando questo genera un flusso d'aria verso il basso. Infatti, in prossimità del profilo le linee di corrente non hanno altra possibilità che seguire la sua superficie, arrivando al bordo d'uscita con una componente verticale di velocità che prima non possedevano, ed essendo quindi state accelerate verso il basso. La forza di reazione è perpendicolare alla direzione iniziale della linea di corrente, e il verso opposto a quello di accelerazione del flusso, come accade nel caso di un tubo curvo (*fan*) ventilato; la forza di reazione, inoltre, è proporzionale alla portata (o flusso di massa, cioè massa per unità di tempo). Tale portata aumenta con la grandezza della superficie deflettente, la vela, e con la componente verticale di velocità dell'aria deflessa (individuando globalmente una dipendenza quadratica con la velocità), mentre diminuisce al calare della densità del fluido⁷, come può succedere con l'aumentare dell'altitudine o della temperatura⁸.

Analogamente alla vela, le ali di un aereo sono spinte verso l'alto perché, essendo inclinate, deflettono l'aria verso il basso. Partecipano alla deflessione sia superficie inferiore sia superiore: sul dorso il flusso si *attacca* alla superficie seguendone il profilo e l'inclinazione (*effetto Coanda*, o di *attaccamento del flusso*). Infatti, a condizione che gli angoli di attacco non siano troppo elevati (condizioni di *stallo*), il flusso segue la forma geometrica del profilo o, analogamente, il profilo forza le linee di corrente a seguire la sua curvatura, e la necessaria forza radiale che determina l'andamento curvo delle linee di corrente è conseguenza del gradiente di pressione *perpendicolare* alla linea di corrente. Infatti, un volumetto di fluido che non segue la curvatura e si muove su una linea dritta immediatamente genera una diminuzione di pressione tra sé e il corpo tale da determinare un gradiente in direzione perpendicolare alla superficie. Quindi, su un volumetto di fluido si ha pressione inferiore sotto di esso e superiore

⁷ l'acqua, per esempio, ha una densità mille volte maggiore dell'aria quindi, per un motoscafo che vuole planare, il meccanismo di deflessione e generazione della portanza è analogo, ma servono superfici minori per farlo

⁸ a temperature superiori la resistenza sarà minore, ma serviranno velocità maggiori per sviluppare la medesima azione portante

sopra, e la variazione radiale di pressione è la forza centripeta (per unità di volume: *equazione di L. Eulero*) che lo fa curvare lungo il profilo. Pertanto, la causa della bassa pressione è la curvatura della superficie, e un volume d'aria che si avvicina al profilo sarà *risucchiato* da tale zona di bassa pressione, subendo anche un'accelerazione tangenziale alla linea di corrente (e sul ventre analogamente).⁹ Quindi, la più elevata velocità della linea di corrente è conseguenza diretta della bassa pressione data dalla curvatura, e non viceversa.¹⁰

L'inerzia dell'aria è critica: è importante che essa continui il suo moto verso il basso *oltre* il bordo d'uscita; infatti, la generazione della portanza non si registra nei fluidi estremamente viscosi, dove questo meccanismo non si riesce a manifestare.¹¹

Teorie errate

In uno svariato numero di fonti, quali enciclopedie, manuali e libri di fisica, siti web, musei della scienza e della tecnica, si trovano errate spiegazioni sull'origine della portanza. Le teorie sulla generazione della portanza sono diventate una fonte di grandi controversie e argomento di accese discussioni per diversi anni.¹²

La teoria errata più diffusa è quella dell'*egual tempo di transito* o del *cammino più lungo*, che suppone che le molecole di dorso e ventre (separate al bordo d'attacco) debbano riunirsi al bordo d'uscita. La superficie superiore, progettata più lunga di quella inferiore, genererebbe, in virtù dei diversi tragitti, velocità più elevate di quella inferiore. Tale teoria, che guarda unicamente alla *forma* del profilo e non alla deflessione del flusso, invoca quindi *Bernoulli* per spiegare le minori e maggiori pressioni su dorso e ventre origine della forza di portanza. Nella realtà, la velocità sul dorso è considerevolmente più elevata di quella che produce un egual tempo di transito. L'errore di tale teoria appare evidente già considerando che essa non spiega il funzionamento delle vele, il volo degli aerei di carta, dei primi aeroplani (*Wright Flyer*), degli aquiloni e dei deltaplani (dove i percorsi sono uguali), né il volo invertito e i profili supercritici (dove la superficie ventrale è più estesa). Inoltre, la presenza di zone a più alta e a più bassa pressione sul ventre contraddice qualunque spiegazione basata sulla lunghezza dei percorsi.

⁹ K. Weltner – Bernoulli's law and aerodynamic lifting force, 1990

¹⁰ K. Weltner – A comparison of explanation of the aerodynamic lifting force, 1986 American Journal of Physics

¹¹ <http://amasci.com/wing/rotbal.html>

¹² <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/bernnew.html>

Esiste un'altra teoria errata che utilizza la *Terza legge di Newton* applicata alla superficie inferiore dell'ala equiparando la portanza aerodinamica a quella di un sasso che salta sull'acqua, trascurando il fatto che entrambe le superfici di un'ala contribuiscono all'azione sul fluido.

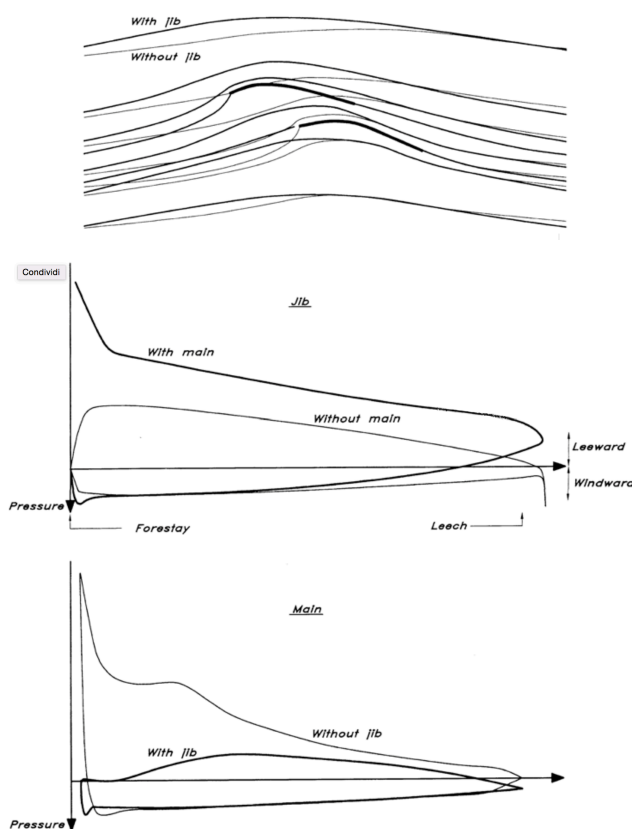


Fig. 2. 5

Un'ultima teoria scorretta è quella che fa riferimento all'*effetto Venturi* per determinare la velocità, senza considerare che la sezione di un'ala non è metà di un tubo di Venturi; il modello è errato anche per spiegare l'interazione tra randa e vela di prua e l'ipotetico conseguente risucchio. In realtà, tra le due vele non vi è un'accelerazione o facilitazione dello scorrimento dell'aria ma, al contrario, la formazione di un *effetto tappo*. Il restringimento è un piccolo disturbo che, in primo luogo ostacola, limita e rallenta il passaggio dell'aria nel canale, dando luogo a un picco di aspirazione sulla randa meno accentuato. In secondo luogo, esso favorisce una depressione sottovento al genova e una sovrappressione sopravento a esso (fonti di maggiore forza propulsiva) e sottovento alla randa. Le qualità propulsive della randa sono quindi in parte sacrificate in favore del ruolo o funzione essenziale svolta per l'equilibrio delle due vele, tale da massimizzare la velocità del flusso sottovento al genova senza fileggiare. Il

parziale beneficio della sovrappressione sul dorso della randa è la possibilità di bordare e cazzare maggiormente la randa senza farla stallare. Infatti, se il genova è troppo bordato (o la randa lasciata), le pressioni sopra e sottovento alla randa tendono a pareggiarsi facendola fileggiare. Infine, l'*effetto tappo* dato dal restringimento tra vela maestra e vela di prua tende a deviare il flusso sulle superfici esterne, dando al bordo d'attacco un vento più largo che permette di stringere maggiormente il vento senza far fileggiare la vela.

2.3 La vela tradizionale

Generalmente le vele delle imbarcazioni sono confezionate da apposite aziende specializzate - i cui tecnici prendono il nome di velai - con moderni tessuti idrorepellenti, quali fibre a base di *dracon* o *nylon* (impiegato la prima volta nel 1946) e, più di recente, anche *kevlar* e fibre di carbonio. La vela viene issata sull'albero, che tradizionalmente è realizzato in legno secondo una tecnica complicata e costosa di sottocomponenti incastrati tra loro. La tecnica moderna assolve meglio le necessità di contenimento dei costi offrendo alberi realizzati in lega leggera estrusa, o in materiali sofisticati.

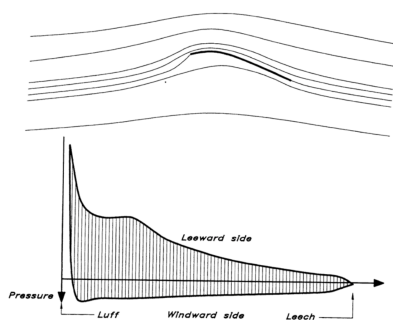


Fig. 2.6

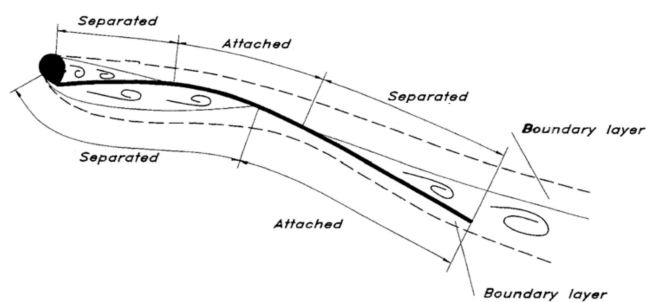


Fig. 2.7

Alla regolazione delle vele, che gonfiate dal vento richiedono sforzi notevoli, concorrono speciali argani di demoltiplicazione chiamati *winch* e, solitamente, le scotte sono opportunamente rinviate presso la postazione del timoniere per cercare di ridurre al minimo il numero dei componenti l'equipaggio di una barca a vela.

Le vele cambiano per diversi fattori. Il materiale incide molto su forma e elasticità delle vele. Per esempio, il carbonio rende le vele molto rigide, dando la possibilità di realizzare superfici stabili molto ampie, che permettono magrezza con vento forte e ampiezza della superficie con vento debole. Quando realizzate in *dracon*, esse non mantengono la forma originale a lungo. La vele cambiano anche per forma, disegno e quantità di *grasso* inserita dal velaio in fase di progettazione: esistono vele studiate per forte vento e vele ideate per brezze leggere.

Filetti segnamento

Il rendimento di una vela è maggiore quando il flusso d'aria scorre su entrambe le superfici, interna e esterna, senza staccarsi da esse e creare turbolenza. Perché questo succeda, è necessario che l'angolo di incidenza non sia inferiore a una certa soglia, sotto la quale la vela fileggia, e superiore a un certo valore, sopra il quale la vela stalla. La vela tradizionale lavora all'incidenza ideale: il punto di ristagno coincide con il bordo d'attacco, cosicché le linee di corrente seguono traiettorie dolci, mostrano picchi di aspirazione meno elevati e ricompessioni più gradualmente ritardando, in tal modo, la separazione. Nelle andature portanti, invece, le vele sono necessariamente stallate, e la propulsione è principalmente data dalla pressione dell'aria sul lato sopravento.

I filetti segnamento (*tell tales*) sono disposti ogni 3-4 metri d'altezza a 25-30 cm dallo strallo e dall'albero, per evitare la discreta turbolenza generata a valle di esso in ragione del loro maggiore spessore rispetto a quello della vela. Nelle andature con flusso attaccato, quali *bolina*, *traverso* e *lasco stretto*, essi forniscono una valida indicazione per regolare la randa e il genoa. Il comportamento dei filetti è determinato dalla formazione di una *bolla di separazione* al bordo d'attacco nel momento in cui ci si allontana dall'incidenza ideale. Infatti, il metodo alternativo per regolare le vele in ogni andatura in assenza dei filetti è quello di lasciarle finché esse non pungono (si crea una pancia vicino al bordo d'attacco) e a quel punto cazzare lentamente finché non smettono di farlo. La formazione della bolla determina una modifica del profilo della vela, le cui prestazioni crollano drasticamente rispetto alla configurazione di progetto.

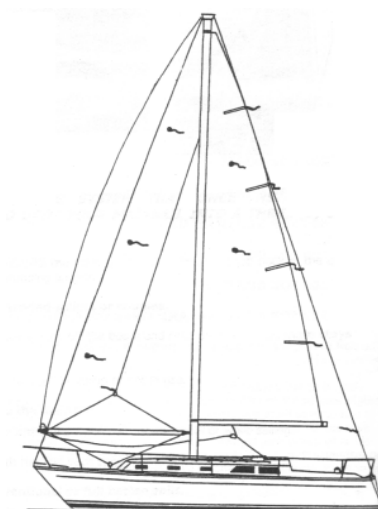


Fig. 2. 8

I filetti mostravento sono utili per trovare l'esatto punto di scotta della vela, che va regolata comunque con l'intensità del vento e del mare (altezza delle onde), oltre che in ragione del tipo di vela e della sua superficie. I segnamento devono essere ben tesi su entrambi i lati; in caso contrario, essi sbattono irregolarmente dal lato che riceve poco vento, dove il flusso non rimane attaccato e crea turbolenza.

Regolazione delle vele

In generale, più è intenso il vento più occorre smagrire le vele e, viceversa, ingrassarle con poca aria. Con venti leggeri, in ogni caso, una vela eccessivamente *grassa* sarebbe dannosa poiché sottovento, per la bassa velocità dell'aria e per l'attrito che essa fa sulla vela, il flusso non sarebbe più attaccato e la depressione calerebbe notevolmente verso il bordo d'uscita.

Sulle vele di strallo, una volta regolata la scotta in accordo ai filetti segnamento inferiori, agendo sul carrello si può variare il punto di scotta, avanzandolo per le andature *portanti* o arretrandolo per le andature *montanti*. Nel primo caso, da eseguire se la parte alta fileggia, la balumina della vela si tende e aumenta la trazione su di essa; nel secondo, da eseguire se la parte alta è in stallo, si tende la base e la balumina svergola in alto, diminuendo l'angolo di incidenza in prossimità della penna. I *tell tales* disposti in alto forniscono la giusta indicazione a questo proposito.

Nel caso della randa, oltre all'indicazione fornita dai filetti in prossimità del bordo d'attacco, si dovrebbe cercare una regolazione che renda i segnamento sulla balumina orizzontali e allineati alla direzione del profilo al bordo d'uscita. Tuttavia, i segnamento sulla balumina della randa sono meno significativi di quelli del fiocco. Questa vela, in ogni caso, è più visibile e solitamente si regola lasciando la scotta finché la randa non comincia a sbattere e poi cazzando un poco. Inoltre, si agisce su *vang* e amantiglio per tendere la balumina o svergolarla (aprendola in alto per diminuire l'incidenza), specialmente con i venti deboli, quando la velocità in testa d'albero può essere notevolmente maggiore rispetto a quella della base e il vento apparente sarà più al traverso.

Con vento forte, invece, si desidera diminuire la potenza delle vele per evitare uno sbandamento eccessivo. Navigare in bolina con la barca troppo sbandata sottopone a sforzo scafo, sartie e attrezzature, ed è anche penalizzante in termini della componente di velocità nella direzione di provenienza del vento (VMG), perché la deriva perde portanza e lo scarroccio aumenta. Conviene quindi ridurre la tela per tempo, e appiattire il più possibile le vele perché siano meno portanti. Si cerca di far scaricare la parte alta dal vento forte, contribuendo in questo modo ad abbassare il centro velico e quindi diminuendo il momento sbandante: si sposta verso poppa il punto di scotta agendo sul carrello e permettendo alla vela di svergolarsi. Infine, in bolina all'aumentare del vento occorrerà flettere l'albero, per eliminare buona parte del grasso dalle vele.

Con mare ondoso la barca ha bisogno di potenza per superare le onde, e quindi di grasso sulle vele per risalire le creste. Con vento debole, è necessario dare il massimo grasso alle vele: drizze morbide, albero dritto, carrelli della vela di prua in avanti e quello della randa sopravento.

La regolazione, quindi, serve in primo luogo per imporre l'angolazione delle vele al vento, ma anche per controllare la profondità dei profili, l'apertura della balumina, la flessione dell'albero, il beccheggio e lo sbandamento dello scafo. L'indicazione dei filetti segnamento, e quindi l'adeguata regolazione delle vele su tutta l'altezza, sono importanti sia per raggiungere la massima velocità, sia per non perdere l'assetto o rendere la barca instabile e difficile da governare.

Incidenza e curvatura

L'entità della portanza generata da un profilo dipende principalmente dalla velocità del flusso indisturbato e dall'angolo di attacco (*incidenza geometrica*) α_a , angolo tra il flusso indisturbato e la *corda*, di estremi sulla linea media del profilo. Infatti, con l'incidenza aumenta la deflessione dell'aria e quindi l'entità della forza di reazione sul corpo.

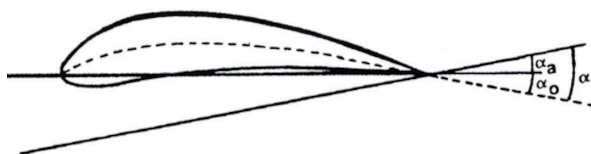


Fig. 2. 9

Per valori troppo elevati dell'incidenza la turbolenza aumenta, l'entità della deflessione e dell'accelerazione verticale del flusso diminuiscono e la portanza torna a calare (condizione *stallata*). Prima dello stallo, per un certo tratto, l'andamento della portanza è lineare con l'incidenza, perché l'entità della deflessione è espressa dalla componente di velocità verticale impressa al flusso e, in prima approssimazione, essa è il prodotto tra velocità del flusso indisturbato e il *seno* dell'angolo di deflessione α , essendo questo la somma di angolo d'attacco α_a e angolo α_0 tra la *corda* e la direzione del profilo al brodo di uscita (espressa dalla tangente alla linea media, che è data dalla geometria del profilo e, quindi, costante). Pertanto, un profilo curvo *porta* anche a *incidenza geometrica* nulla. Se all'*incidenza geometrica* si somma l'angolo tra corda e direzione di portanza nulla, si ottiene invece l'*incidenza aerodinamica*, cui tuttavia non si farà riferimento nel seguito dell'elaborato.

L'aumento della curvatura del profilo (*camber*) comporta: spostamento dell'angolo di portanza nulla (che vale circa metà del rapporto tra massima freccia e corda); aumento della massima portanza raggiungibile e del *range* lineare in cui la vela funziona in maniera efficiente (data dall'aumento del raggio del naso aerodinamico di bordo d'attacco, che rende meno sfavorevole il gradiente avverso); aumento della minima resistenza (poco marcato, perché dominata da quella viscosa, e poco significativo, perché relativo a portanze ridotte); per elevate portanze, diminuzione della resistenza; per basse portanze, aumento della resistenza.

Più alte sono le portanze a cui si lavora (come nel caso di vento debole), più alta sarà la curvatura di ottimo da scegliere, e più *grasse* e *concave* saranno da regolare le vele. Viceversa, con

vento forte si preferirà limitare la portanza per contenere il momento sbandante, e ci si servirà di vele più *magre*.

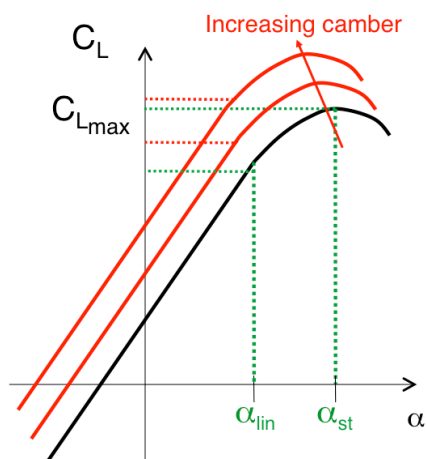


Fig. 2. 10

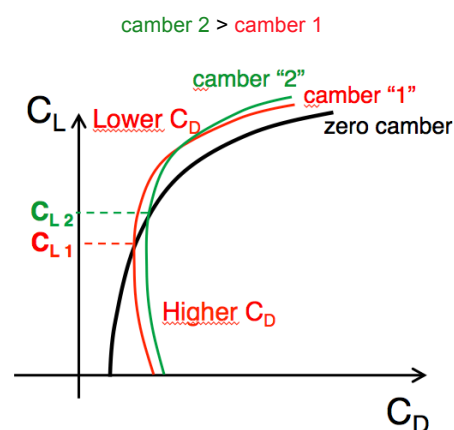


Fig. 2. 11

I vortici d'estremità, sopra l'angolo di penna e sotto il boma, costano energia, e penalizzano la velocità della barca in termini di *resistenza indotta*. Una vela alta e stretta (*allungamento alare* maggiore) risente meno di tale effetto, ed è quindi più efficiente. Il rapporto tra spinta e sbandamento è legato al rapporto tra portanza e resistenza (*efficienza aerodinamica*), e varia solitamente tra il valore di 5:1 delle vele comuni e quello di 10:1 per le vele di Coppa America.

2.4 La vela rigida

Di sempre maggiore diffusione è l'impiego della vela rigida (*wingsail*) al posto della randa tradizionale, secondo una soluzione già presentata da BMW Oracle nel corso della 33esima America's Cup del 2010, consentendo la vittoria sulla tradizionale vela in tessuto di Alinghi. In seguito, dall'annuncio che la 34esima America's Cup sarebbe stata corsa su catamarani spinti da vele rigide multi-elemento, l'interesse per vela rigida è cresciuto considerevolmente.



Fig. 2. 12

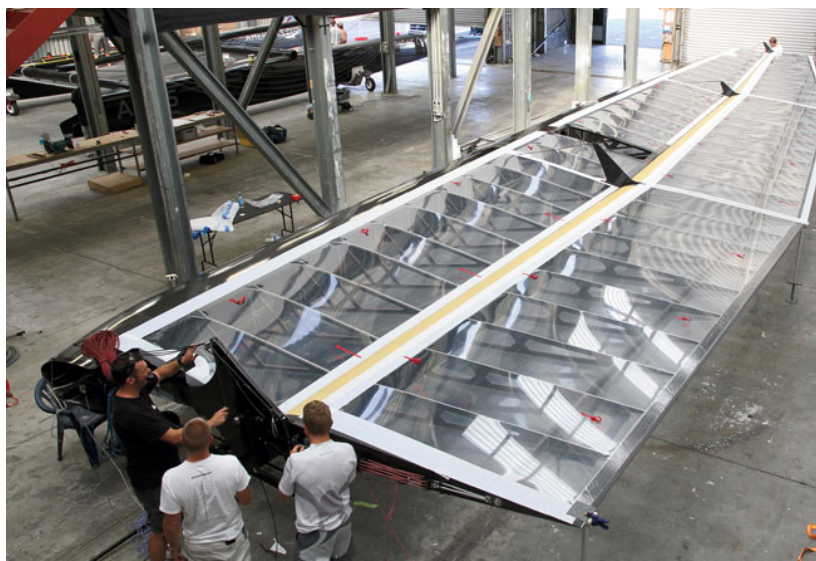


Fig. 2. 13

Benefici

La *wingsail* ha un profilo alare spesso, simile a quello utilizzato in ambito aeronautico, ed è in grado di sviluppare portanze e spinte maggiori del sottile profilo di una vela tradizionale grazie alla maggiore differenza di pressione tra dorso e ventre del profilo con spessore. Pertanto, a parità di forza sviluppata, la vela rigida richiede un angolo di attacco minore di quella tradizionale e ciò permette di ridurre le forze di sbandamento e scarroccio. Le prestazioni nettamente superiori della vela rigida a parità di angolo di incidenza giustificano l'attuale affermazione della ricerca nel campo, che mira a sostituire l'imbarcazione tradizionale con randa e fiocco con una soluzione a profilo alare. Infatti, se correttamente progettate, in

condizioni di progetto le vele rigide riescono a sviluppare una distribuzione di forze spostata in avanti, che le rende molto più efficienti di quelle convenzionali.¹³

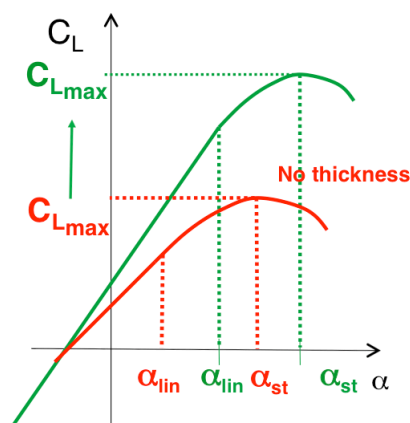


Fig. 2. 14

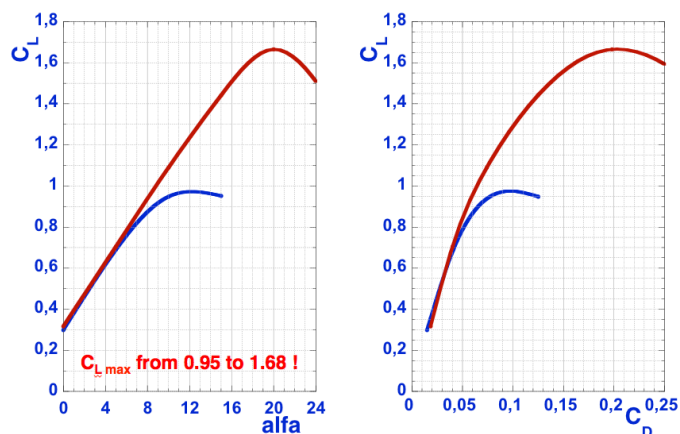


Fig. 2. 15

Inoltre, le bolle di separazione generate dai profili ad alta resistenza degli alberi sono rimosse, dando minor resistenza a bassa incidenza per assenza della separazione e consentendo così di ottenere flussi ad alta efficienza.

La ricerca in ambito aeronautico ha portato alla progettazione di dispositivi di bordo d'attacco e d'uscita a portanza elevata, che trovano nel campo nautico un'applicazione rilevante. I più usati sono i profili a *slotted flap* o con *flap esterno*, che consentono di ottenere portanze eccezionalmente elevate (2-3 volte maggiori della vela convenzionale) senza comportare un aumento rimarchevole di resistenza: essi, inoltre, sono in grado di generare maggiori portanze per una data incidenza, e anche per una data resistenza. L'efficacia dello *slotted flap* deriva dall'aumento della curvatura effettiva del profilo complessivo e dal canale tra *main* e *flap*, che conduce aria a più elevata energia dal ventre del primo al dorso del secondo. Il recupero di depressione e la conseguente riduzione del gradiente avverso di pressione sul dorso del profilo ritardano la separazione del flusso sul *flap* e permettono di raggiungere deflessioni (curvature) e portanze superiori.¹⁴ Analogamente, dal punto di vista aerodinamico il *fiocco* rappresenta un *leading edge high lift device*: esso è altamente accoppiato con l'ala e con essa descrive complessivamente un'unica superficie portante.

¹³ Nicola Boccardi, *Ottimizzazione di una vela rigida per l'imbarcazione Cherubina*

¹⁴ A.W.Blakely *Design and Optimization of Multi-Element Wing Sails for Multibull Yachts*, 2012

Nel caso di vento forte, la vela tradizionale può essere depotenziata svergolandola in altezza, per generare meno portanza in testa d'albero; la vela rigida permette di andare oltre, consentendo alla portanza di diventare negativa, riducendo il momento di rollio e consentendo la generazione di portanze complessive maggiori. Un altro grande vantaggio permesso della *wingsail* è quello di richiedere scafi sensibilmente più leggeri, non più sottoposti ai carichi estremamente elevati per mantenere le vele tese nella loro forma ottimale. Inoltre, la rigidità strutturale della *wingsail* (garantita dal maggiore momento di inerzia della sezione), la costanza della forma del suo profilo e la precisione nel seguire i movimenti imposti fanno sì che portanza e resistenza siano prevedibili e costanti in ciascuna configurazione, rendendo il suo controllo semplice e accurato.

Gli svantaggi di una *wingsail* rispetto alla tradizionale *soft sail*, in ogni caso, sono tali da poterla rendere una soluzione impraticabile per alcune applicazioni. Le ragioni che giustificano la sua lenta adozione sono: impossibilità di ridurre la sezione all'aumento della velocità del vento, cui si rimedia solitamente imponendo lo svergolamento all'ala; difficoltà di controllo in presenza di raffiche; maggiore pesantezza e fragilità; difficoltà nel trasporto e nel maneggiamento; impossibilità di ridurre la sua superficie o di ammainarla, rendendo difficoltoso l'ormeggio; difficoltà di realizzazione di strutture asimmetriche adattabili e flessibili; maggiore costo e tempi di costruzione.

Stallo

In corrispondenza dello stallo il flusso può cessare di muoversi nel verso indisturbato e invertirsi verso monte: il flusso separa dalla superficie e crea una larga scia di ricircolo a valle del punto di separazione. L'entità della separazione si manifesta su superfici *piane* in misura dipendente dal gradiente di pressione e dal numero di Reynolds, oppure in maniera immediata nel caso di profili appuntiti, con piccolo raggio del naso al bordo d'attacco (di fatto, per l'elevato gradiente di pressione).

Se lo strato limite di una vela rigida è in regime laminare, esso potrà separare oppure diventare turbolento, acquisendo uno spessore maggiore e una resistenza più elevata alla separazione. Quando lo strato limite separa prima che la transizione sia avvenuta, può succedere che il

flusso riattacchi a valle, formando una *bolla di separazione*, che dipende dal gradiente di pressione e dal numero di Reynolds (che non deve essere troppo basso affinché essa si generi).

Lo stallo di bordo d'uscita è graduale e caratteristico dei profili spessi ($t/c > 12-15\%$), descritti da un picco di aspirazione rotondo, agli alti Re. Lo stallo di bordo d'attacco avviene per profili di spessore intermedio, con una bolla di separazione laminare vicina al bordo d'attacco che all'aumentare dell'incidenza ha inizio più a monte e, improvvisamente, non riesce più a riattaccare. Nei profili sottili ($t/c < 7-10\%$) a bassi numeri di Reynolds la bolla di separazione si forma anche a bassissime incidenze, non appena ci si allontana dall'incidenza ideale, per poi crescere gradualmente verso il bordo d'uscita fino a quando non riesce più a riattaccare.

Alcune famiglie di profili manifestano una combinazione di stallo di bordo d'attacco e d'uscita, attribuito all'esistenza di una piccola bolla in un certo *range* di numeri di Reynolds e allo strato limite conseguente, che avrà la tendenza a separare di bordo d'uscita: lo stallo avrà un picco di portanza leggermente tondo seguito da una perdita improvvisa di portanza, o un picco affilato seguito a un calo di portanza meno rapido.¹⁵

In ogni caso, lo stallo non dipende unicamente dallo spessore, ma è legato a tutti i fattori che dominano la crescita dello strato limite, quali il gradiente di pressione, il numero di Reynolds, la turbolenza del flusso a monte e la rugosità della superficie. La massima resistenza allo stallo e la massima generazione di portanza possono essere ottenute per ogni sezione della vela nei modi che si sono visti: aumentando la curvatura (dispositivi di alta portanza) e rienergizzando il flusso sul dorso per aumentare l'incidenza di stallo (*slotted flap*).

¹⁵ D. W. Atkins, *The CFD assisted design and experimental testing of a wingsail with high lift devices*, 1996

Capitolo III

Sensori di pressione

3.1 Misura della pressione

La misura della pressione aerodinamica è un tema centrale di diversi ambiti, quali l'aeronautica, l'*automotive* e la nautica, ed è oggetto di grande interesse per la caratterizzazione del flusso aerodinamico e per lo studio delle prestazioni.

I trasduttori di pressione sono strumenti capaci di convertire la pressione applicata in un segnale elettrico (tensione o corrente) facilmente registrabile, trasmissibile ed elaborabile. Generalmente, la pressione è lasciata agire su un'opportuna superficie causando la deformazione di un elemento elastico, la cui misura è data da trasduttori estensimetrici, capacitivi, induttivi, a trasformatore differenziale, piezoelettrici o piezoresistivi.

I sensori di pressione si differenziano per diversi parametri, come *range* di lavoro, stabilità, precisione, ripetibilità, e frequenza di risposta delle misure. La *precisione* indica la concentrazione dei valori intorno alla media della serie delle misure effettuate, ed è solitamente quantificata con il modulo del coefficiente percentuale di variazione. L'*accuratezza* esprime, invece, l'assenza di errori sistematici nella misura, ovvero la vicinanza della media delle misure al valore *vero* della grandezza. La *risoluzione* è la più piccola variazione dell'ingresso che provoca una variazione dell'uscita, mentre la *sensibilità* è la derivata della curva di taratura dello strumento. La *ripetibilità* quantifica l'attitudine del trasduttore a produrre la stessa uscita alla successiva applicazione di uno stesso ingresso. L'*isteresi*, infine, fornisce un'indicazione della

capacità di un trasduttore di produrre la stessa uscita sia nel caso l'ingresso sia raggiunto da valori inferiori sia superiori ad esso.

In molteplici settori, dal biomedico all'elettronico, la microtecnologia sta diventando un aspetto promettente in rapidissima evoluzione. Nella Formula Uno il carico aerodinamico è monitorato durante i test da alcuni scanner di pressione miniaturizzati posizionati sul fondo della vettura. I principali tipi di sensori di pressione utilizzati sono *piezoresistivi micromachined*, *capacitivi touch-mode micromachined*, *capacitivi ceramici* e *piezoresistivi polisiliconici on-steel*.

Di seguito una breve carrellata sugli aspetti chiave dei principali trasduttori.

3.2 Trasduttori

Trasduttori capacitivi

Il principio di misura dei trasduttori capacitivi si basa sulla variazione della capacità elettrica che deriva dalla deflessione di una delle sue armature, e trovano largo impiego in applicazioni di laboratorio, in ambito industriale, biomedico e aerospaziale.

Nei trasduttori capacitivi a singolo statore è presente un solo condensatore formato da un'armatura fissa e da una mobile, costituita dal diaframma: la deformazione subita dall'elemento elastico provoca una variazione dello spessore dello strato di dielettrico e di conseguenza la variazione di capacità del condensatore.

Questi trasduttori presentano una lieve dipendenza dalla temperatura e dalle proprietà dielettriche del fluido di misura, ma garantiscono elevata sensibilità e precisione anche a basse pressioni, ridotta isteresi, buona risposta in frequenza ed elevata linearità.

Trasduttori piezoelettrici

Le misurazioni dinamiche di pressione utilizzano sovente sensori che basano il loro funzionamento sull'effetto piezoelettrico. La piezoelettricità è il fenomeno per cui alcuni materiali con struttura cristallina, detti genericamente cristalli piezoelettrici, generano una tensione elettrica a causa di una deformazione meccanica di natura elastica o, viceversa, si

deformano elasticamente se sottoposti all'azione di un campo elettrico. Tali cristalli, infatti, se sollecitati secondo direzioni opportune, presentano uno stato di polarizzazione: l'azione meccanica esterna comporta una migrazione di cariche che si traduce in una differenza di potenziale elettrostatico. Il processo di orientazione dei dipoli, polarizzazione (*poling*), è analogo a quello della magnetizzazione di un magnete permanente (*ferromagnetico*), e condizione necessaria per l'esistenza di tale fenomeno è l'anisotropia del materiale.

Tra i materiali con questa proprietà il più usato è certamente il quarzo (SiO_2), per via della sua stabilità e sensibilità. L'elemento sensibile dei trasduttori può essere costituito anche da materiali artificiali come i policristallini ceramici, resi piezoelettrici dall'applicazione di un forte campo elettrico. Essi possono adattarsi di forma e dimensione e possono lavorare in ambienti con temperature elevate, sebbene il loro segnale sia influenzato dalle variazioni termiche (materiali *pireoelettrici*): il *punto di Curie* rappresenta il limite superiore delle temperature raggiungibili da una ceramica piezoelettrica, oltre le quali essa perde in modo completo e permanente le sue proprietà piezoelettriche.

I trasduttori piezoelettrici presentano alta impedenza in uscita ma anche buona accuratezza e ottima risposta in frequenza.

Sensori piezoresistivi

La piezoresistività è la caratteristica dei materiali di variare la propria resistenza elettrica se sottoposti all'azione di una forza esterna. Tale effetto è veramente apprezzabile solo in alcuni materiali, primi tra tutti i cristalli di silicio. Tuttavia, al contrario di quanto accade nel caso dei piezoelettrici, la variazione di resistenza ha luogo sia con forze statiche che dinamiche.

Storicamente, essi nascono come tecnologia alternativa ai classici estensimetri, tanto che in alcuni casi sono citati come *estensimetri a semiconduttore*. Al manifestarsi di una deformazione i sensori piezoresistivi variano la propria resistenza principalmente perché varia la resistività del materiale sensibile, mentre negli estensimetri ciò succede quasi esclusivamente per la variazione della lunghezza e della sezione del conduttore che realizza il sensore.

3.3 Stato dell'arte

L'Università di Pisa collabora con l'azienda R.i.CO. S.r.l. (Ing. Emilio Franchi, R&D Manager), che ha sede ad Ancona e opera anche nel *Laboratorio di Elettronica di Potenza* del Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Ateneo pisano. La collaborazione dell'azienda con il Dipartimento di Aerodinamica Applicata (Prof. Giovanni Lombardi) e con il Prof. Stefano Giordano mira alla realizzazione di un innovativo *sensore di pressione piezoelettrico wireless autoalimentato*.

Il dispositivo esiste ancora nella forma di prototipo, nella versione preliminare di *trasduttore capacitivo*. Essa si presenta come una sottile striscia di circa 0,5 mm di spessore e 10 mm di larghezza, che vede la possibilità di disporre diversi sensori in schiera, in una configurazione *a matrice*. Ciascuno di essi è costituito, in particolare, dai seguenti strati di materiale, uniti per mezzo di una sottile patina di adesivo *prepreg epossidico*:

1. isolante esterno in poliestere
2. prima armatura (rame)
3. 50 μm di *kapton*, pellicola poliimide flessibile (stabile in un ampio *range* di temperature)
4. 200 μm di *FR4*, resina epossidica rigida con funzione di distanziale (forata dove deve consentire la deflessione delle armature)
5. 50 μm di *kapton*
6. seconda armatura (rame)
7. isolante esterno in poliestere

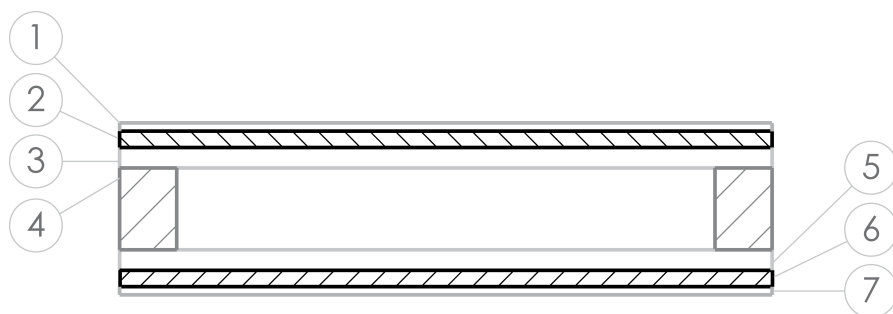


Fig. 3. 1

Il sensore, nel corso dell'ultimo semestre, ha conosciuto diverse modifiche e miglioramenti atti ad adattare la sua risoluzione all'applicazione in esame. Questi hanno visto i diversi strati

cambiare di entità, e la dimensione di un'armatura ridursi verso una soluzione in cui essa giace solo all'interno della membrana flessibile su cui è applicata, senza costituire un vero e proprio strato uniforme e continuo del dispositivo.

In ogni caso, la realizzazione del sensore non è ancora perfezionata, e il suo completamento soggetto ai tempi imprevedibili dati dalla *ricerca*. Le potenzialità dello strumento, tuttavia, sono promettenti, e il suo sviluppo incoraggiante. Pertanto, l'analisi del criterio secondo cui munire di sensori una vela rigida procede, da un lato, dalla consapevolezza delle possibilità offerte e dei limiti realisticamente imposti dagli strumenti odierni; dall'altro, essa si spoglia dei margini instabili di una tecnologia galoppante, e analizza le potenzialità dello studio divenendo parte attiva del processo inarrestabile di innovazione, come *specificata tecnica* di prodotti ancora da realizzare.

Riferendosi alle condizioni di lavoro, si osservi che la vela opera a coefficienti di pressione C_p che spaziano dal valore di 1 del punto di ristagno a quello di -11 del picco di aspirazione sul *main*. Se, inoltre, la velocità del vento apparente si considera ragionevolmente compresa tra i valori di 3 m/s con vento debole e 10 m/s con vento forte, si vede che i sensori dovranno lavorare nel seguente *range* di pressioni:

	$v = 5 \text{ m/s}$	$v = 10 \text{ m/s}$
$C_p = 1$	15 Pa	60 Pa
$C_p = -11$	- 170 Pa	- 700 Pa

Tab. 4. 1

Un nodo centrale per la realizzazione dei sensori è rappresentato dal tema della *risoluzione*. Una delle funzioni primarie della strumentazione è misurare la compressione sul naso per individuare la posizione del punto di ristagno. Come si vedrà in seguito, per le incidenze di interesse, misure adiacenti della pressione totale mostreranno scostamenti medi di circa l'1.6% del valore massimo della stessa.

Perché tali valori siano distinti, si richiede ai trasduttori una precisione almeno dell'0.8% sul minimo valore della pressione di ristagno che è riscontrato nelle diverse condizioni operative. Ciò avviene alle basse velocità, e si traduce in un requisito sulla risoluzione minima dei sensori di almeno dodici centesimi di Pascal (0.12 Pa). Questo valore corrisponde allo 0.2 % del valore

di fondo scala in compressione, e non pare proibitivo se confrontato con quello di 0.14 % del Tubo di Pitot e di 0.1 % delle Scannivalve che già da cinque anni sono in uso nella galleria del vento dell'Università di Pisa. In tal caso, gli errori sulla misura della pressione totale - evidentemente, più incidenti alle basse velocità del vento apparente - sarebbero tollerabili in tutto il *range* di velocità del vento apparente considerate (5-10 m/s).

A questo proposito, il grafico seguente rappresenta l'andamento dell'errore percentuale sulla misura della pressione totale commesso in ragione della precisione del sensore, e lo mostra per tre valori della stessa. Si noti che un trasduttore che abbia una risoluzione di due decimi di Pascal (0.2 Pa) comporterebbe un errore complessivamente tollerabile (contenuto nel limite dello 0.8%) a partire da velocità del vento apparente maggiori di 6.4 m/s. Si noti, allo stesso modo, che sensori che abbiano una risoluzione 0.5 Pa non sarebbero già più soddisfacenti.

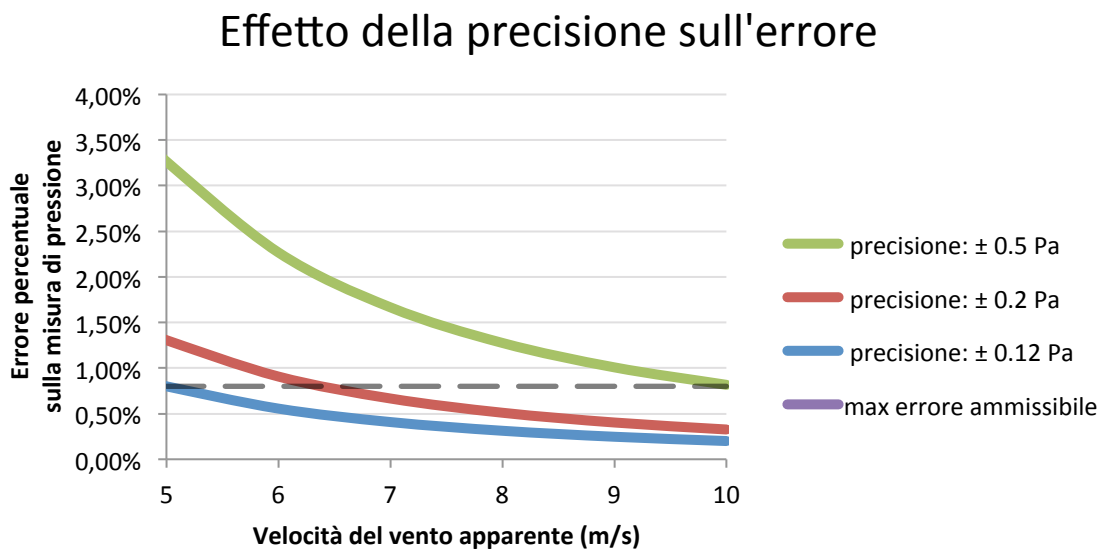


Fig. 3. 2

In fin dei conti, sembra assolutamente ragionevole l'adozione di sensori diversi per la compressione e l'aspirazione rispettivamente, giacché queste operano su zone e ordini di grandezza differenti. La specializzazione dei sensori alle diverse scale può essere una scelta in grado di facilitare la realizzazione tecnologica e ottenere grande precisione nei risultati.

A titolo di esempio, dei sensori di diametro 10 mm dovrebbero indicativamente operare con azioni di compressione di picco tra i 120 mg e 480 mg (con risoluzione di 0,75 mg) e con azioni di aspirazione di picco tra 1.3 g e 5.4 g (con risoluzione di 0,008 g).

Capitolo IV

Analisi CFD

L'utilizzo di software che permettano di eseguire analisi CFD è uno strumento sempre più diffuso grazie, soprattutto, agli enormi progressi compiuti negli ultimi anni dall'industria dei calcolatori. Il grande vantaggio fornito dal calcolo numerico rispetto all'analisi sperimentale risiede nella possibilità di ottenere una grande quantità di informazioni con spese ridotte, in termini di tempo e costi, soprattutto nelle fasi preliminari di progetto, nelle quali spesso è necessario valutare un numero considerevole di configurazioni diverse.

Per questo studio è stato utilizzato il codice commerciale ANSYS Fluent 14, che utilizza un metodo di discretizzazione spaziale ai volumi finiti con griglia strutturata, nella quale le grandezze scalari sono calcolate sotto forma di media integrale all'interno degli elementi tridimensionali di cui si compone il dominio, mentre le caratteristiche vettoriali sono valutate sulle facce degli stessi.

L'impostazione della simulazione si articola nei seguenti punti:

1. Creazione e importazione del modello geometrico e del dominio di calcolo;
2. Generazione della mesh di volume;
3. Impostazione del modello fisico-matematico di risoluzione;
4. Definizione delle condizioni al contorno;
5. Creazione dei report delle principali caratteristiche di interesse;
6. Calcolo del flusso.

Gli ultimi quattro passaggi possono essere agevolmente automatizzati realizzando degli script contenenti le istruzioni desiderate, in modo da consentire l'autonoma esecuzione di diverse simulazioni in serie.

4.1 Geometria di riferimento

Il modello geometrico cui si fa riferimento è stato generato tramite il software CAD *Catia V5R19* nel corso di un precedente lavoro di tesi, al quale si rimanda per una descrizione dettagliata, che non rientra negli scopi di questo elaborato.¹⁶

Di seguito, pertanto, saranno richiamate solo le caratteristiche di maggiore rilevanza della vela rigida in esame, prestando particolare attenzione ai gradi di libertà di cui essa dispone per la navigazione.

Nella costruzione della geometria è stata adottata la metodologia di progettazione parametrica, in modo tale da consentire agevolmente l'introduzione di modifiche e la gestione dell'assetto.

Caratteristiche principali

La vela è composta da due elementi strutturali, il primo denominato di qui in seguito *main*, e il secondo *flap*.

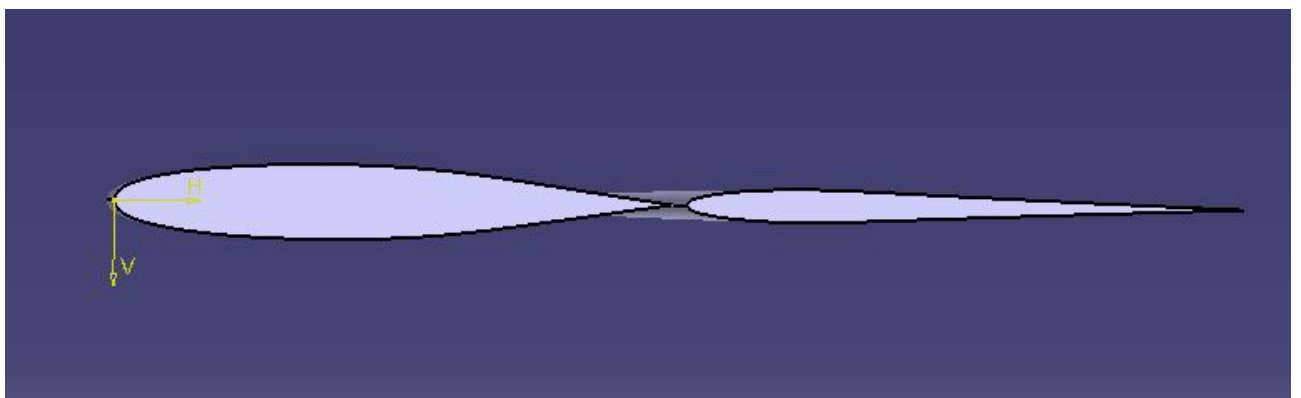


Fig. 4. 1

¹⁶Nicola Boccardi, *Ottimizzazione di una vela rigida per l'imbarcazione Cherubina*

I profili aerodinamici che costituiscono le sezioni delle due semi-vele sono entrambi simmetrici, per permettere di lavorare in egual maniera su entrambe le mura a prescindere dalla direzione del vento. Essi hanno uno spessore percentuale di circa 13,5% il *main* e 9% il *flap*, e hanno lunghezza relativa costante di sezione in sezione.

Il *gap* presente tra main e flap, in condizione di deflessione del flap nulla, è pari all'1,3% della corda complessiva, intesa come distanza tra il bordo d'attacco del main e il bordo d'uscita del flap. Essa ha un valore di 2,5 m per la sezione di base e di 1.15 m in testa d'albero.

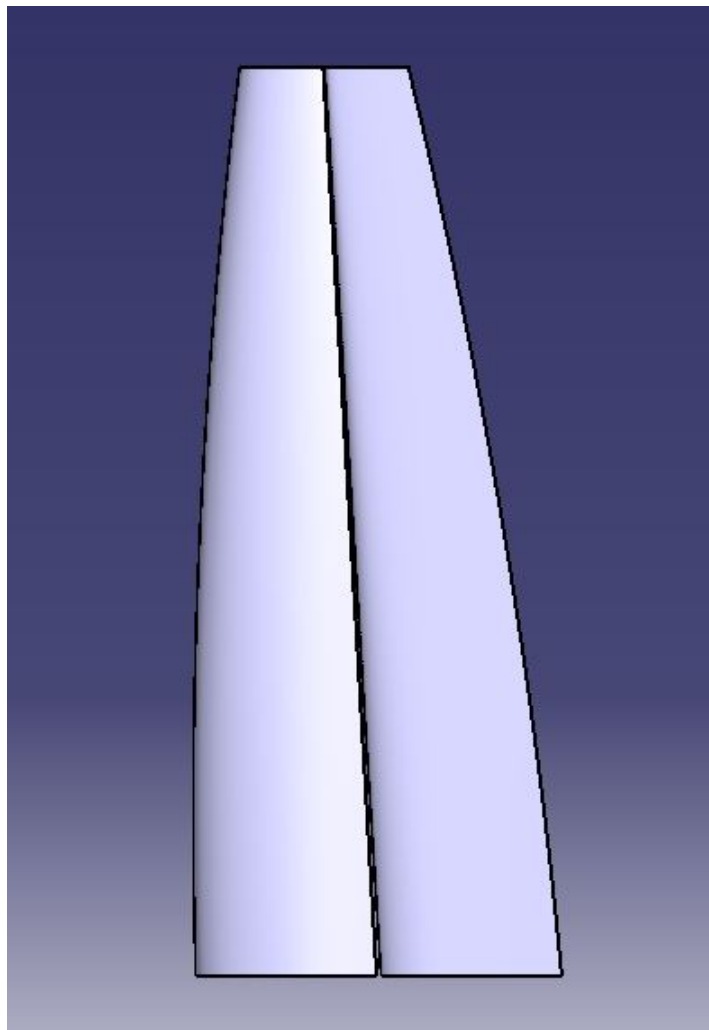


Fig. 4. 2

La vela complessivamente è alta 6.2 m, e la proiezione laterale della sua superficie in condizione di deflessione del flap nulla ha un valore di 12.17 m².

Gradi di libertà

I parametri disponibili per la definizione dell'assetto di navigazione sono quattro:

1. *Angolo di scotta*: angolo formato dalla corda del main con la direzione longitudinale prua-poppa della barca. La vela principale può essere ruotata intorno a un punto posto al 10% della sua corda, e la vela secondaria si mantiene solidale a essa in questo movimento. Questo parametro non condiziona il comportamento aerodinamico della vela, mentre riveste massima importanza durante la navigazione.
2. *Incidenza*: angolo formato dalla corda del main con la direzione del vento apparente.
3. *Deflessione*: angolo formato dalla corda del flap con la corda del main. Il flap può essere ruotato rispetto a un punto posto al 95% della corda del main.
4. *Svergolamento*: angolo compreso tra la corda del flap nella sezione di testa e corda del flap nella sezione di base.

Gli ultimi tre parametri possono essere facilmente modificati all'interno del modello CAD, dove sono nominati rispettivamente come *Teta_1*, *Teta_2* e *svergolamento_tip*.

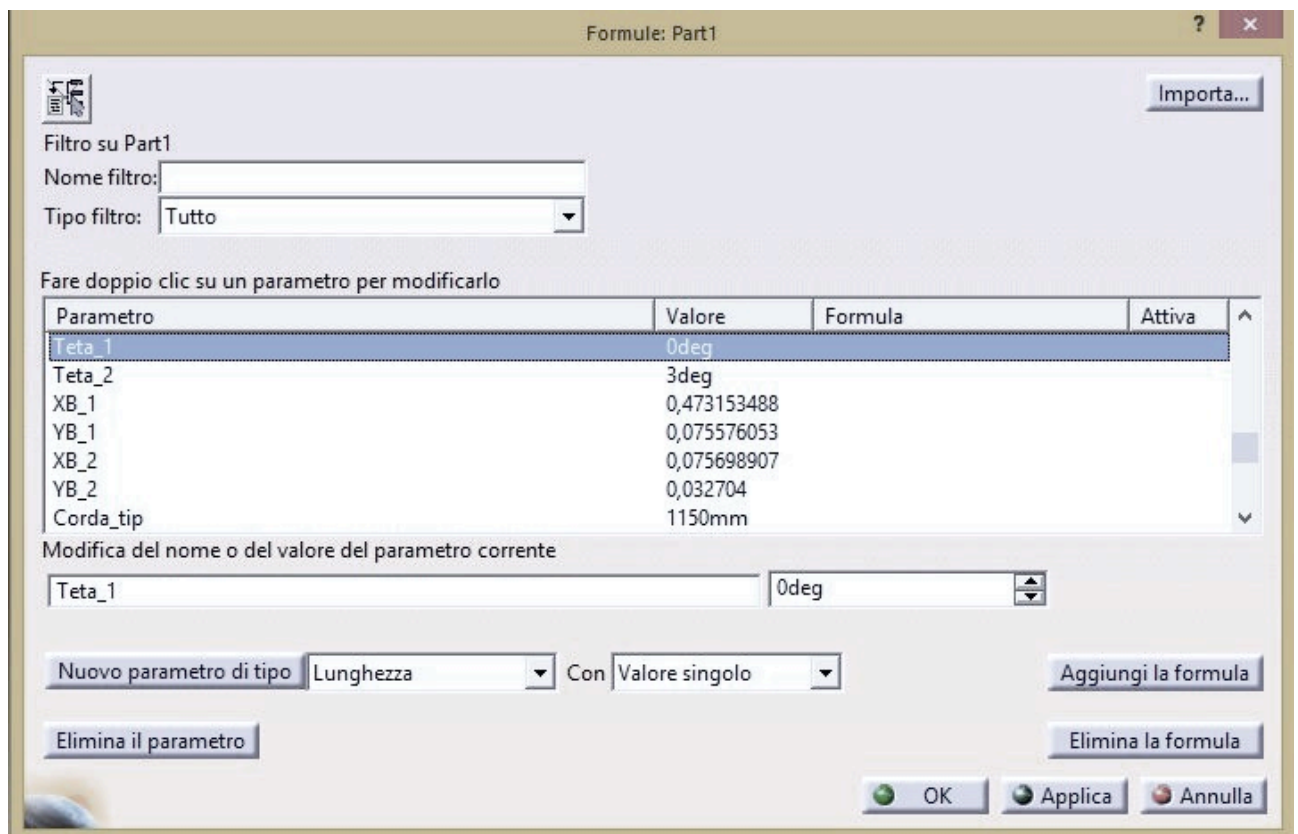


Fig. 4. 3

Dominio di calcolo

Il dominio fluido di calcolo è stato generato specificamente per le simulazioni CFD necessarie allo svolgimento di questo studio. Per individuare le dimensioni necessarie a ridurre in maniera opportuna la sensibilità dei risultati alla geometria del volume di calcolo si è fatto riferimento a precedenti lavori riguardanti lo stesso argomento.

La sua forma, invece, è stata scelta in maniera tale da rendere agevole la simulazione a diversi valori dell'incidenza senza rendere necessaria la modifica della griglia di calcolo. La parte frontale del dominio nella forma in pianta è un arco di circonferenza centrato nell'origine degli assi e con raggio pari a circa 8 volte la corda totale alla base, mentre la parte posteriore è posta 9 corde dietro il punto più arretrato della vela, ed è larga complessivamente circa 25 corde. Il ventaglio di collegamento ha un'apertura di 20° .

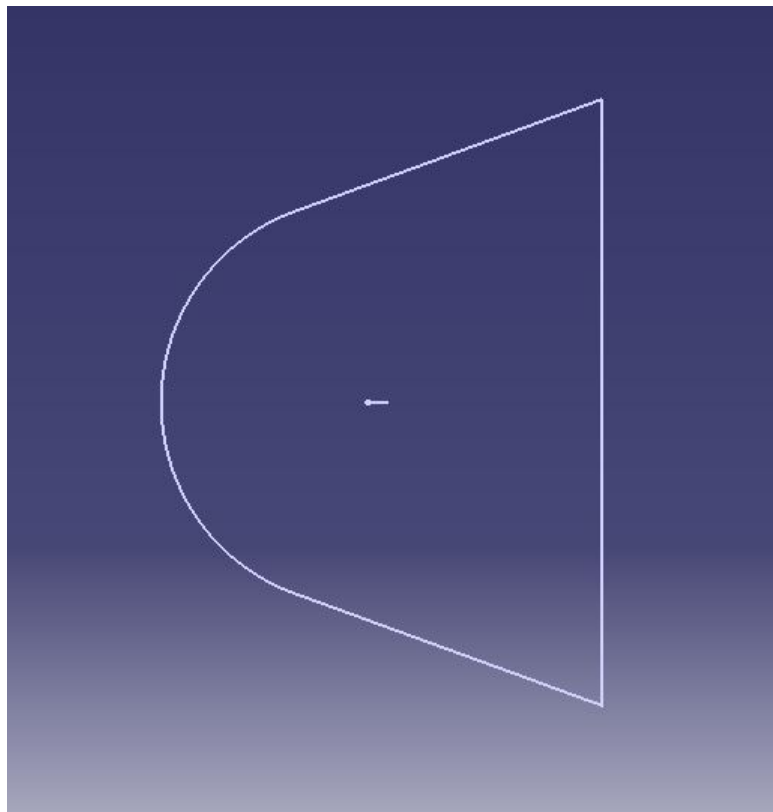


Fig. 4. 4

4.2 Generazione della *mesh*

Importazione del modello geometrico

Il passaggio all'analisi fluidodinamica vera e propria prevede come prima operazione l'importazione di modello geometrico e dominio di calcolo all'interno del software utilizzato per la creazione della *mesh*. Nel caso in esame, ci si è serviti di ANSYS Workbench 15, il quale offre la possibilità di importare direttamente i file in formato .CATPart generati in precedenza.

I passi da seguire per l'importazione sono i seguenti:

1. Avviato il software, è sufficiente selezionare dal menu *Toolbox* lo strumento di *mesh* e avviare un nuovo progetto nello spazio di riepilogo *Project Schematic*.

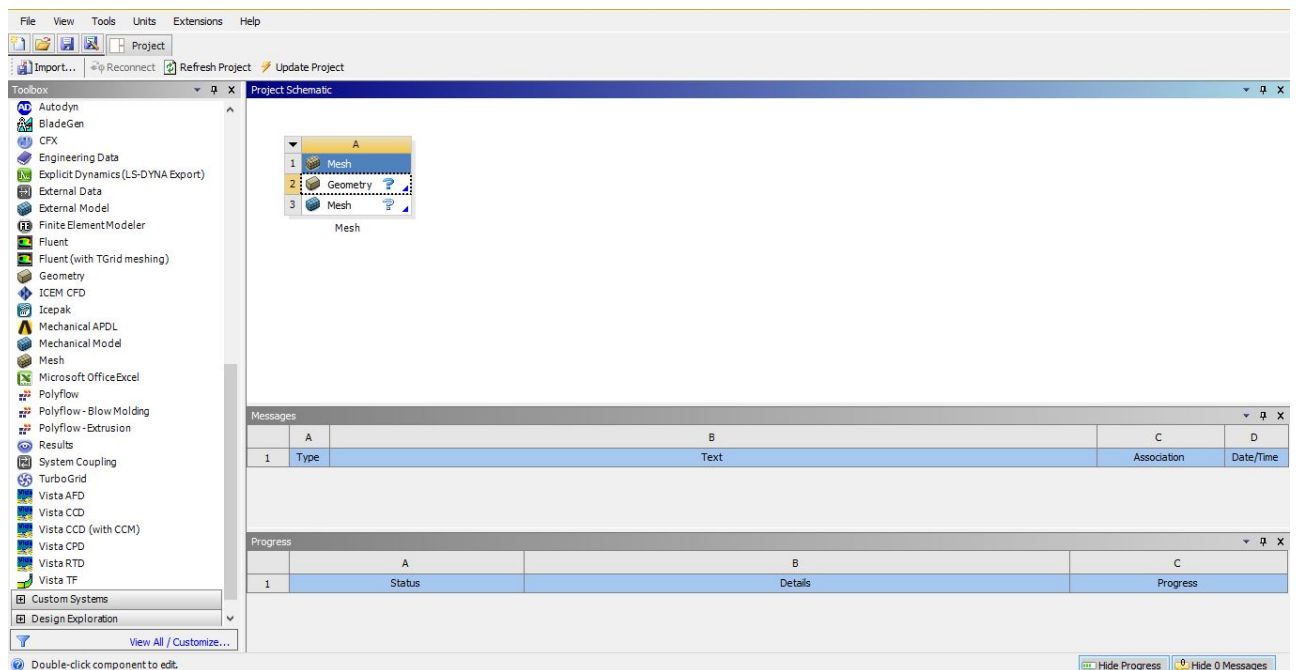


Fig. 4. 5

2. Spostarsi quindi nell'ambiente *Geometry* per procedere, tramite il comando *File-Import External Geometry File*, all'importazione del modello geometrico, comprensivo del dominio.

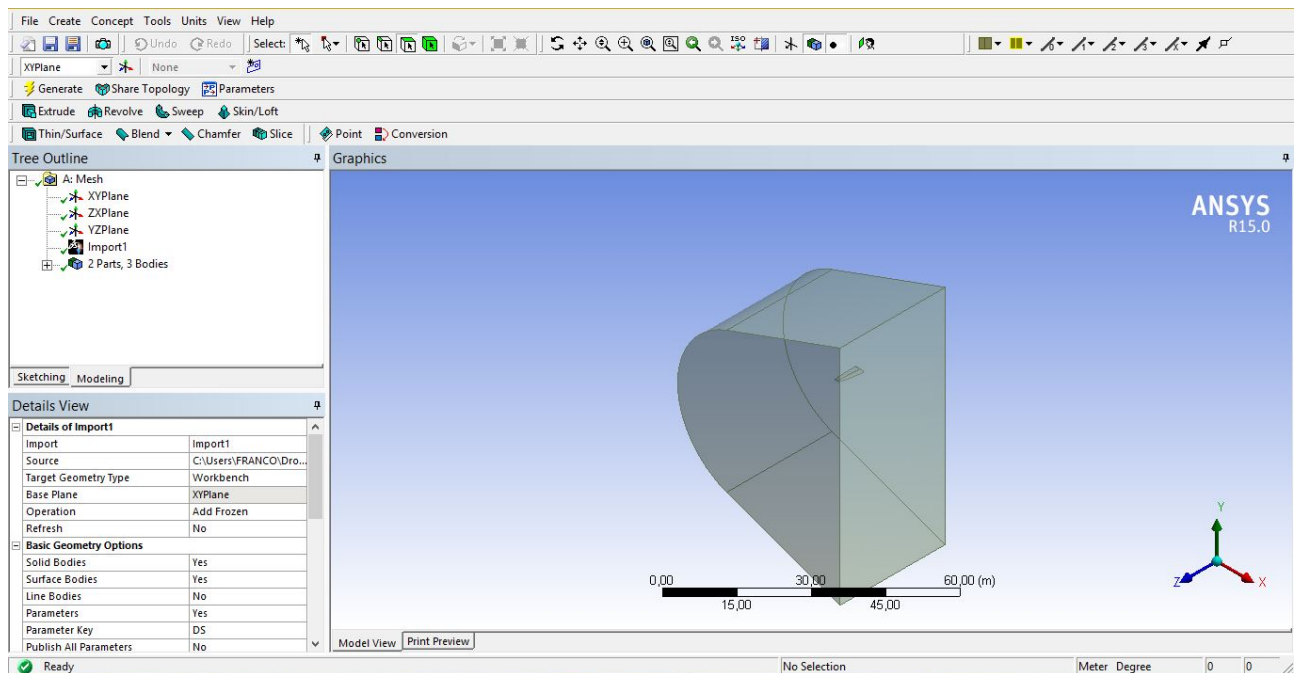


Fig. 4. 6

3. Grazie al comando *Create-Boolean-Subtract* si procede infine all'eliminazione del modello della vela dal volume fluido complessivo, per ottenere il dominio effettivo di calcolo. A questo punto, selezionando il corpo, è possibile assegnare la caratteristica di *Fluid* in luogo di quella default di *Solid*.

Griglia di calcolo

Grazie a studi precedenti, sono già note alcune caratteristiche indicative che la griglia di calcolo deve possedere per portare a dei risultati soddisfacenti.

Il risultato di una qualsiasi simulazione numerica è sensibile alla risoluzione spaziale della *mesh*: per volumi di calcolo di dimensioni analoghe a quelle esaminate, un numero di elementi compreso tra 20 e 30 milioni può essere considerato adeguato, se è garantito un progressivo infittimento con l'avvicinarsi dal dominio *indisturbato* alla superficie della vela, nella zona del flusso maggiormente influenzata dalla presenza del corpo. Se pure è vero, infatti, che in condizioni di flusso subsonico tutto il campo risente della presenza di un qualsiasi disturbo, è anche chiaro che questa influenza diventi trascurabile oltre una determinata distanza.

Inoltre, è bene osservare che, per un fluido viscoso, la condizione di non scorrimento sulle pareti di un corpo porta alla generazione di una zona nella quale si concentra la vorticità del campo e all'interno della quale si generano gradienti di velocità piuttosto elevati lungo la direzione normale alla parete: è necessario, pertanto, prevedere in tale direzione un infittimento della griglia, quantomeno all'interno della zona interessata maggiormente da questo *strato limite*.

Infine, può essere importante compiere un controllo sulla qualità della *mesh* generata. In particolare, è bene evitare la presenza di un numero elevato di elementi eccessivamente allungati, i quali potrebbero dare problemi alla convergenza della soluzione.

Parametri assegnati

Di seguito si elencano gli step attraverso i quali è stata realizzata la discretizzazione del dominio di calcolo:

1. Nel menu di dettaglio della sezione di *meshing* si seleziona CFD con *Solver Preference* per Fluent, sotto la voce *Physics Preference*
2. Il settaggio della *mesh* è stato svolto innanzitutto modificando i parametri di *sizing* nel menu di dettaglio:

Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	12,0 °
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	5
<input type="checkbox"/> Min Size	3,e-003 m
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	3,e-003 m
<input type="checkbox"/> Max Face Size	Default (4,19220 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (8,38450 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,10
Minimum Edge Length	0,574820 m

Fig. 4. 7

3. In seguito, sempre nel menu di dettaglio, viene impostato un *inflation layer* intorno al corpo; si tratta di uno strato di elementi esaedrici piuttosto allungati e che possono in particolar modo essere infittiti in direzione normale a una superficie. Lo scopo sarà quello di avere una risoluzione adeguata nella direzione del gradiente di velocità nello strato limite intorno alla vela:

Inflation	
Use Automatic Inflation	Program Controlled
Inflation Option	First Aspect Ratio
<input type="checkbox"/> First Aspect Ratio	5,
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	7
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,1
View Advanced Options	Yes
Collision Avoidance	Layer Compression
Fix First Layer	No
<input type="checkbox"/> Gap Factor	0,5
<input type="checkbox"/> Maximum Height over Base	1
Growth Rate Type	Geometric
<input type="checkbox"/> Maximum Angle	140,0 °
<input type="checkbox"/> Fillet Ratio	1
Use Post Smoothing	Yes
<input type="checkbox"/> Smoothing Iterations	20

Fig. 4. 8

4. Successivamente dal menu *mesh control* si seleziona l'opzione di *sizing* andando a selezionare le facce rappresentanti la vela e impostando una dimensione degli elementi di 0,01 m sotto la voce *element size*.

Named Selections

Nell'ambiente di *meshing* è possibile inoltre nominare le varie superfici del dominio per fare in modo che vengano successivamente riconosciute automaticamente le varie condizioni al contorno su *Fluent* e per selezionare inoltre le superfici interessate dall'*inflation layer*.

Per farlo basta cliccare con il tasto destro del mouse su una qualsiasi delle superfici e selezionare *Create Named Selection*. A quel punto si può scegliere il nome e se includere la

superficie scelta tra quelle sulle quali verrà creato l'*inflation layer*. Si riepilogano di seguito le superfici nominate:

Nome	Superficie	Program Controlled Inflation
<i>velocity-inlet</i>	Faccia frontale del dominio ad arco di circonferenza e facce laterali inclinate a 20°	Exclude
<i>pressure-outlet</i>	Faccia posteriore del dominio	Exclude
<i>symmetry-sea</i>	Faccia inferiore del dominio	Exclude
<i>symmetry-top</i>	Faccia superiore del dominio	Exclude
<i>wingbody</i>	Facce della vela	Include

Tab. 4. 2

4.3 Modello fisico-matematico

Equazioni di Navier-Stokes

Le *equazioni di Navier-Stokes* sono un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali che descrive il moto dei fluidi dal punto di vista macroscopico. Le ipotesi alla base di questo modello richiedono che il fluido possa essere considerato un continuo, che si trovi in ogni istante in uno stato di equilibrio termodinamico, che sussista una relazione di proporzionalità diretta tra il tensore degli sforzi viscosi e il tensore delle velocità di deformazione (*fluido newtoniano*) e che sia applicabile la *legge di Fourier* per la trasmissione del calore.

Sotto queste ipotesi, è possibile esprimere i *bilanci* di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia che, uniti alle *equazioni costitutive* rappresentanti il comportamento del fluido in esame e alle *condizioni iniziali* e al *contorno* su velocità e temperatura, costituiscono il sistema di *equazioni di Navier-Stokes*.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0$$

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \text{grad} \vec{v} \right) = -\text{grad} p + \rho \vec{f} + \text{div} \bar{\tau}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho e + \rho \frac{v^2}{2} \right) + \vec{v} \cdot \text{grad} \left(\rho e + \rho \frac{v^2}{2} \right) = -\text{div} \vec{q} - \text{div}(\rho \vec{v}) + \rho \vec{f} \cdot \vec{v} + \sum_i \text{div}(u_i \bar{\tau}_i)$$

equazioni costitutive, c.i., c.c.

dove ρ è la densità, \vec{v} è la velocità istantanea, p la pressione, \vec{f} le forze di volume (trascurabili nel caso in esame, in cui il fluido trattato è l'aria), $\bar{\tau}$ è la componente deviatorica del *tensore degli sforzi*, ed e l'energia interna.

Specializzazione al caso di flusso incomprimibile

L'ipotesi di flusso incomprimibile può ritenersi ingegneristicamente valida per valori del numero di Mach inferiori a 0,3: in tale situazione, l'errore commesso nella valutazione del campo di pressione risulta infatti inferiore al 5%. Nel caso in esame, la velocità del flusso è molto bassa, un ordine di grandezza inferiore al valore limite appena introdotto, per cui è ragionevole l'utilizzo di questo modello.

Una grande semplificazione deriva dal fatto che, in questo caso, l'equazione di bilancio dell'energia possa essere considerata disaccoppiata da quella di massa e quantità di moto. Effettivamente, in queste ultime l'unico elemento dipendente dalla temperatura è la viscosità all'interno dell'equazione costitutiva del *tensore degli sforzi*, che però può essere considerata costante giacché la temperatura, quando la densità è costante, varia solo per dissipazione, e tale effetto può essere considerato trascurabile.

Quindi, per la soluzione del campo di velocità e di pressione nel campo fluido, le equazioni di Navier-Stokes si riducono alla seguente coppia di relazione, alla quale andranno affiancate condizioni iniziali e al contorno:

$$\text{div} \vec{v} = 0$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \text{grad } \vec{v} = -\text{grad} \left(\frac{p}{\rho} \right) + \nu \Delta \vec{v}$$

La principale difficoltà, a questo punto, resta dettata dal fatto che queste relazioni rimangono fortemente non lineari e non stazionarie e, pertanto, una soluzione numerica diretta non è praticabile per numeri di Reynolds di interesse ingegneristico, dal momento che richiederebbe un costo computazionale difficilmente sostenibile.

Soluzione dei flussi turbolenti

Per i flussi turbolenti diventa conveniente una descrizione di tipo statistico. La velocità e la pressione vengono scomposte in un valore medio e un valore fluttuante, e le *equazioni di Navier-Stokes* mediate per ottenere le cosiddette equazioni RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*):

$$u_i = U_i + u'_i ; p = P + p'$$

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial u'_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \sum_{j=1}^3 \frac{\partial (\tau_{ij} + \tau_{ij}^t)}{\partial x_j}$$

dove τ_{ij} è l'elemento nella riga i , colonna j del *tensore degli sforzi viscosi* relativo al flusso medio, mentre $\tau_{ij}^t = -\rho \overline{u'_i u'_j}$ prende il nome di *tensore di Reynolds*.

Per modellare questo tensore è necessario introdurre criteri empirici che permettano di esprimerne le componenti in funzione delle grandezze medie presenti nelle equazioni RANS. Sulla base dell'analogia con il *tensore degli sforzi viscosi*, un approccio spesso seguito consiste nell'introdurre una viscosità aggiuntiva detta *viscosità turbolenta*, che non è una caratteristica intrinseca del fluido ma dipende dal moto dello stesso.

Modelli di turbolenza

I modelli di turbolenza vengono catalogati in base al numero di equazioni differenziali alle derivate parziali che vengono aggiunte per caratterizzare la *viscosità turbolenta*. Si dividono perciò in *modelli algebrici* (o a zero equazioni), *modelli a un'equazione* e modelli a due equazioni.

Per la verità, i modelli a un'equazione sono pochissimo usati dal momento che non mostrano incrementi sensibili della capacità di predizione del moto di un flusso rispetto a quelli *algebrici*, che restano molto meno complessi da implementare.

Per questo motivo, qualora non sia possibile accontentarsi dei risultati ottenuti tramite modelli algebrici, vengono usati *modelli a due equazioni*, tra i quali il più comune è il modello di turbolenza k - ϵ , nel quale la *viscosità turbolenta* viene calcolata come funzione di due grandezze indipendenti: l'*energia cinetica turbolenta* k e il *tasso di dissipazione dell'energia turbolenta* ϵ .

Nel caso in esame è stato utilizzato proprio quest'ultimo modello nella sua versione *Realizable*, che storicamente ha dimostrato proprietà di predizione migliori nel caso di flussi esterni coinvolgenti fenomeni di separazione del flusso.

Infine per quanto riguarda lo strato limite, un problema a cui spesso si va incontro è la soluzione delle equazioni di Navier-Stokes in prossimità della parete, dove il gradiente di velocità è molto alto e servirebbe una risoluzione molto elevata. Un metodo spesso utilizzato per evitare l'utilizzo di domini aventi un numero enorme di elementi che richiederebbero costi computazionali estremamente elevati consiste nell'adoperare leggi di parete solitamente logaritmiche che modellano l'andamento del profilo di velocità nello strato limite.

4.4 Solution Setup

Modello di turbolenza

Come anticipato, nella sezione di *Solution Setup* sotto la voce *Models* si va a modificare il solutore sotto la dicitura *Viscous* e si seleziona il modello *k-epsilon* nella versione *Realizable* e con trattamento della soluzione vicino alle pareti tramite le *Non-Equilibrium Wall Functions*.

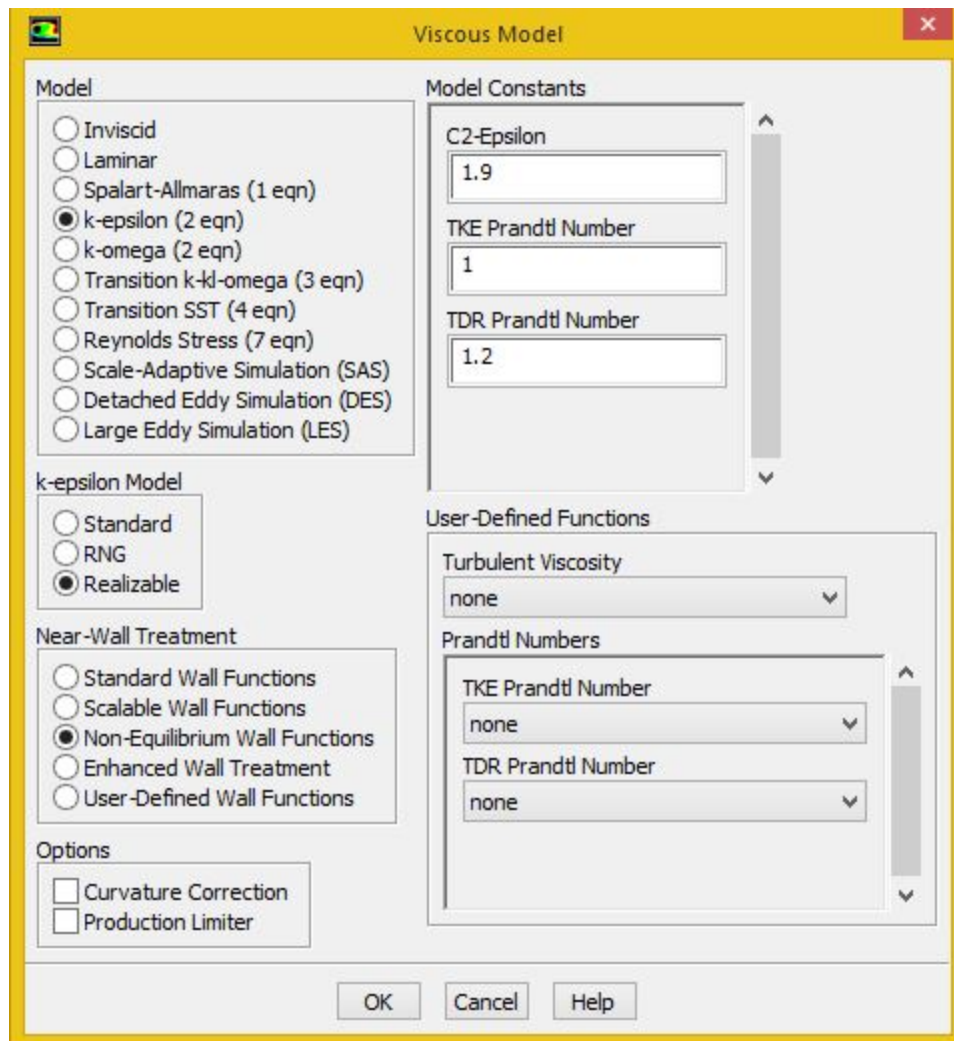


Fig. 4. 9

Condizioni al contorno

Come anticipato in precedenza, durante la creazione della *mesh* ci si è preoccupati di nominare le superfici del dominio in modo che ANSYS Fluent fosse in grado di riconoscere automaticamente il tipo di condizione al contorno da assegnare a ognuna di esse.

Si riepilogano di seguito le principali caratteristiche:

C.c.	Named Sel.	Descrizione e Setup	
velocity-inlet	<i>velocity-inlet</i>	Specification Method	<i>Magnitude and Direction</i>
		Velocity Magnitude	<i>10 m/s</i>
		Specification Method	Intensity Viscosity Ratio
		Turbulent Intensity	1%
		Turb. Viscosity Ratio	10
pressure-outlet	<i>pressure-outlet</i>	Pressione del flusso indisturbato	
symmetry	<i>symmetry-sea</i>	Parete con sforzi tangenziali nulli	
	<i>symmetry-top</i>		
wall	<i>wingbody</i>	Condizione di non scorrimento sulla parete	

Tab. 4. 3

Nelle simulazioni effettuate il setup della condizione di velocity-inlet veniva effettuato tramite alcune righe scritte sui *Journal* utilizzati per lanciare i vari casi di studio. Attraverso il comando */define/boundary-conditions/velocity-inlet* è possibile inserire tutte le variabili citate nonché scegliere i valori dei coseni direttori che venivano variati di volta in volta per simulare il flusso alle varie incidenze senza dover modificare la griglia di calcolo.

Valori di riferimento

Sempre attraverso i *Journal* di lancio, grazie al comando */report/reference-values*, è possibile modificare i valori di riferimento che il programma utilizza per la definizione dei coefficienti. In particolare si fa in modo che le caratteristiche del flusso indisturbato vengano calcolate a partire dal setup della condizione al contorno di velocity-inlet mentre l'area di riferimento è stata calcolata nella configurazione avente deflessione del flap nulla e poi mantenuta per tutte le varie simulazioni.

Solution Methods

L'accoppiamento tra pressione e velocità è stato effettuato secondo lo schema SIMPLEC con una discretizzazione spaziale al secondo ordine anche per la turbolenza, che è possibile impostare selezionando *Second Order Upwind* nei menu a tendina relativi alla *Turbulent Kinetic Energy* e al *Turbulent Dissipation Rate*.

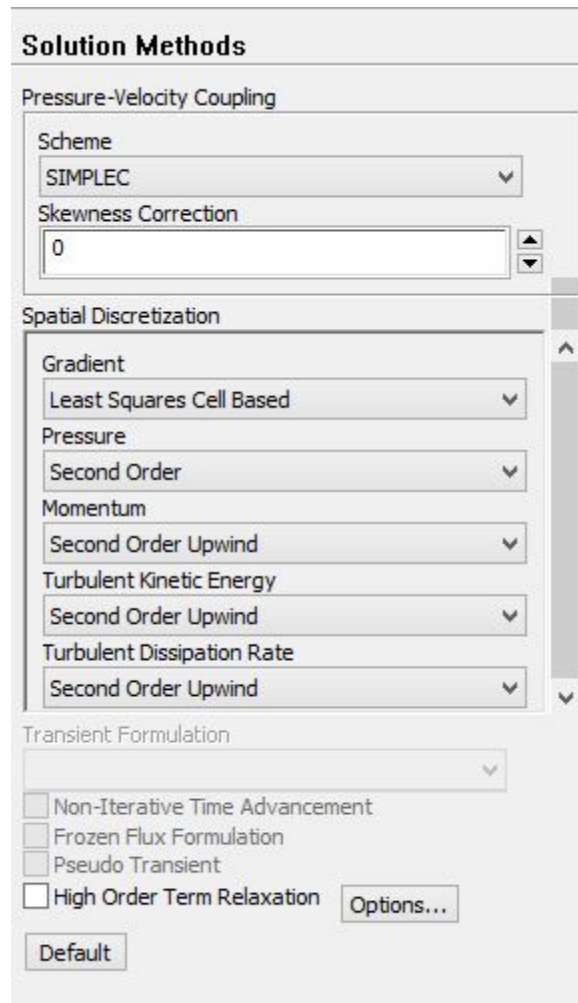


Fig. 4. 10

Monitors

In questa sezione è possibile innanzitutto, modificando le impostazioni relative ai *Residuals*, eliminare i criteri di convergenza facendo in modo che il solutore esegua tutte e sole le iterazioni assegnate attraverso i *Journal* di lancio.

Inoltre, sempre tramite lo script, è possibile definire il monitoraggio dei coefficienti di portanza e di resistenza del corpo, una volta definiti i coseni direttori lungo i quali calcolarli, oltre eventualmente a coefficienti di momento, una volta definiti gli assi.

Risultati

Le ultime righe per ogni simulazione dei file di testo di lancio prevedevano la creazione di due piani di riferimento per l'analisi, uno posto a 2,5 metri dall'origine del sistema di riferimento e uno a 5,6 metri. In corrispondenza di questi sono stati estratti di volta in volta i valori del coefficiente di pressione lungo il profilo della vela in modo da consentirne l'elaborazione.

4.5 Simulazioni

A questo punto è possibile lanciare la simulazione vera e propria, inizializzando il flusso solo per il primo valore di incidenza attraverso il comando `/solve/initialize/hyb-initialization`, definendo il numero di iterazioni, solitamente compreso tra le 1500 e le 4000 e avviando il calcolo, al termine del quale tramite i *Journal* sono stati creati i piani di riferimento ed estratti i coefficienti di pressione in corrispondenza di due altezze della vela pari a 2,5 e 5,6 metri a partire dall'origine del sistema di riferimento, posta 60 cm sotto la base della vela.

Si riporta un riepilogo delle simulazioni effettuate nel corso del lavoro:

Deflessione [°]	Svergolamento [°]	Incidenza[°]
19	0	-19, -15, -11, -7, -3, 1, 3, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 21, 25, 29
3	0	-3, 1, 3, 5, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 21
7	0	-7, -3, 1, 3, 5, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 19
11	0	-13, -8, -3, 1, 5, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 17
15	0	-11, -7, -3, 1, 3, 5, 9, 11, 12, 13, 14, 15
23	0	-17, -12, -7, -3, 1, 3, 5, 9, 10, 11, 12, 13
27	0	-20, -15, -10, -5, -1, 3, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13
31	0	-22, -16, -10, -5, -1, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12
35	0	-25, -18, -11, -5, -1, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 11
19	10	11, 12, 13, 14, 15

Tab. 4. 4

Capitolo V

Risultati

La *fluidodinamica computazionale* ha consentito la simulazione di diverse situazioni di lavoro in tempi contenuti, permettendo la caratterizzazione del flusso aerodinamico generato dalla vela rigida e l'anticipazione della fase di analisi delle letture registrabili dai sensori di pressione.

5.1 Caratterizzazione del flusso aerodinamico

Nel corso dello studio, si è partiti dall'analisi di una configurazione avente deflessione del *flap* pari a 19° e svergolamento nullo; in seguito, sono stati analizzati assetti aventi diverse deflessioni del *flap*, per analizzare l'effetto di questo parametro; infine, sono state eseguite alcune simulazioni con svergolamento non nullo, per studiare l'influenza di tale caratteristica sulle modalità di stallo.

Verranno perciò riepilogate tutte le caratteristiche di interesse, a partire dalle prestazioni della vela in termini di forze generate, per giungere alla descrizione del flusso al variare dell'assetto.

L'analisi e l'elaborazione che seguiranno saranno facilitate dalla possibilità di ottenere dalla CFD le visualizzazioni delle principali proprietà del campo aerodinamico; a tal proposito, si propone a inizio della trattazione una breve carrellata delle caratteristiche principali del flusso intorno alla vela attraverso alcune immagini tratte da *ANSYS Fluent* per l'assetto di 19° di deflessione a 12° di incidenza.

Velocity Magnitude

2,5 metri

5,6 metri

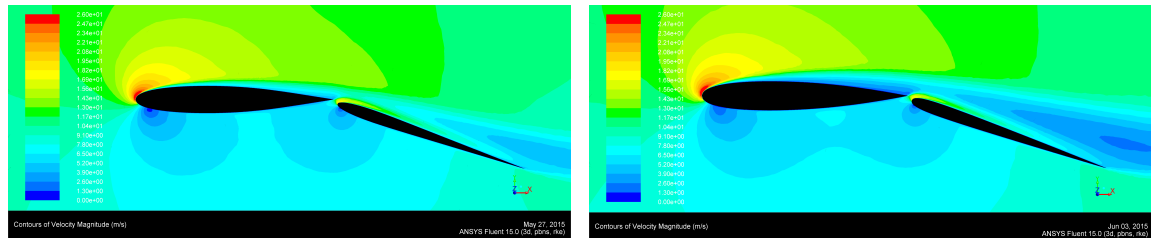


Fig. 5. 1

Il fluido che investe la vela viene accelerato sul dorso, acquisendo velocità elevate in particolar modo in prossimità del bordo d'attacco. Sul ventre, invece, il flusso è decelerato e, in corrispondenza del *gap* presente tra le due parti che compongono la vela, esso viene in parte risucchiato verso il dorso del *flap*, dove si nota una accelerazione del flusso in una zona piuttosto ristretta. A valle del corpo si intuisce la dimensione della scia nella quale, a causa del ricircolo, la velocità media è ridotta rispetto a quella del flusso indisturbato.

Velocity Vectors

2,5 metri

5,6 metri

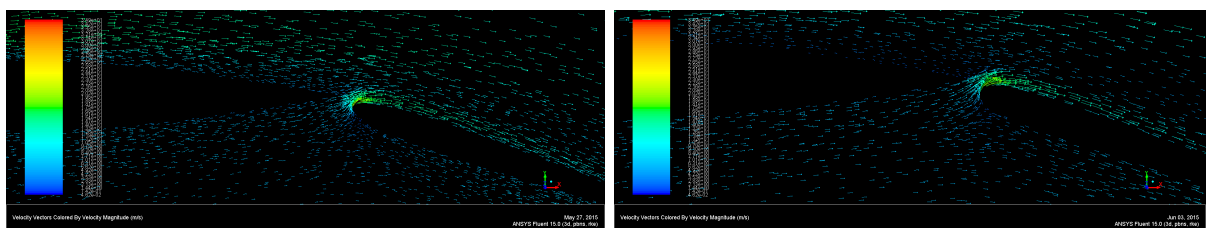
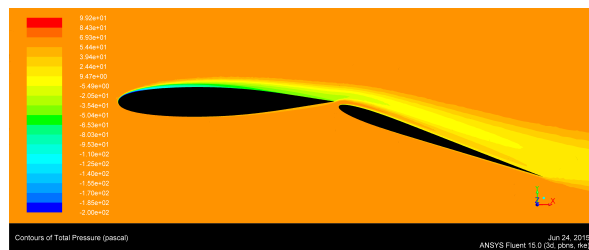


Fig. 5. 2

Il flusso attraverso il canale può essere messo in risalto attraverso i *velocity vectors*, che danno la possibilità di visualizzare il campo di velocità individuato dai vettori tangenti alle linee di corrente del flusso. Il colore e la lunghezza dei vettori vengono definiti in base al valore del modulo della velocità.

Total Pressure

2,5 metri



5,6 metri

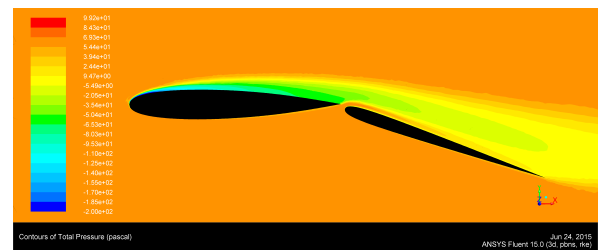
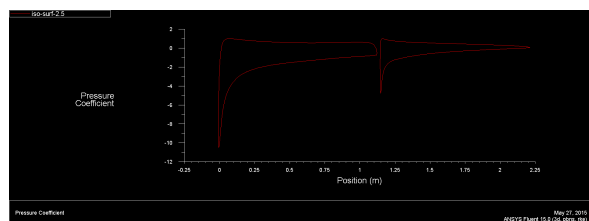


Fig. 5. 3

Grazie al *plot* della pressione totale è possibile individuare in modo evidente la dimensione dello strato limite, dove il suo valore è inferiore rispetto a quello a monte. Infatti, essendo la pressione statica sovrapposta allo strato limite, la diminuzione di velocità dovuta alla condizione di non scorrimento porta a una diminuzione del valore della pressione totale.

Pressure Coefficient

2,5 metri



5,6 metri

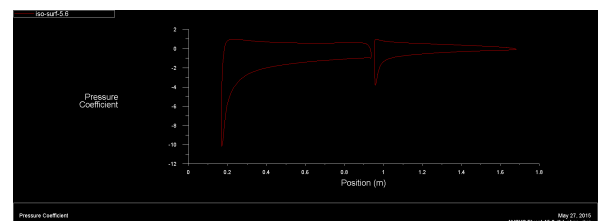


Fig. 5. 4

Infine è possibile esportare dai risultati gli andamenti del coefficiente di pressione in una determinata sezione della vela, sia nella forma di grafici, sia come file di dati che ne consentono l'elaborazione.

5.2 Curva C_l - α

Nella configurazione di riferimento sono state eseguite prove a diverse incidenze, e per ognuna di queste è stato estratto il valore del coefficiente di portanza, riportato ogni 10 iterazioni per permettere un controllo sull'effettiva convergenza del calcolo.

Si riportano i risultati ottenuti e la curva C_l - α :

Incidenza [°]	C_L
-19	-0,25
-15	0,01
-11	0,27
-7	0,54
-3	0,82
1	1,10
5	1,38
7	1,51
9	1,62
10	1,67
11	1,72
12	1,74
13	1,41
14	1,31
15	1,16
17	1,12
21	0,96
25	0,93
29	0,90

Tab. 5. 1

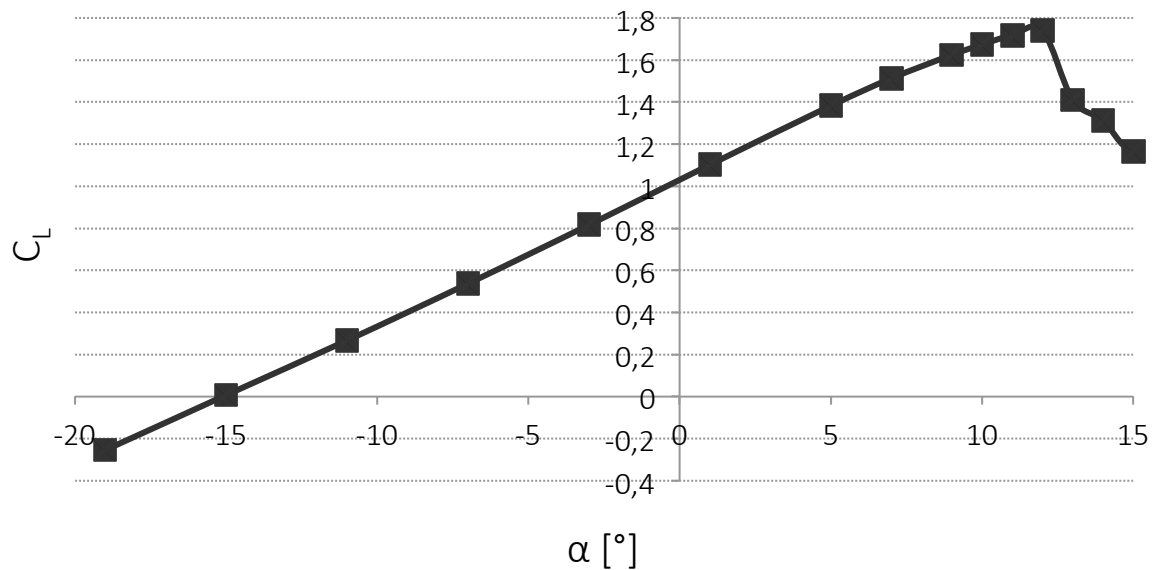
Curva $C_L - \alpha$ (Flap 19°)

Fig. 5. 5

Il coefficiente di portanza presenta un massimo pari a 1,74 in corrispondenza di 12° di incidenza del *main*. L'andamento rettilineo si conserva pressoché invariato fino allo stallo, mentre passando a 13° si ha un crollo di portanza piuttosto marcato, probabilmente sintomo di un'improvvisa estesa separazione del flusso.

L'incidenza di portanza nulla si attesta intorno ai -15,1° e la pendenza del tratto rettilineo è pari a circa 0,065 (misurata come media tra -19° e -11° di incidenza), in ottimo accordo con la teoria della linea portante di Prandtl per la quale si avrebbe per ala finita:

$$C_{L\alpha} \approx 0,11 \cdot \frac{AR}{AR + 2} = 0,0675$$

dove 0,11 è il valore della pendenza della curva di portanza nel caso bidimensionale mentre AR (*Aspect Ratio*) è l'allungamento alare.

Si noti che i valori del coefficiente di portanza da 13° in poi sono da considerarsi solamente indicativi, dal momento che non è stata raggiunta una vera e propria convergenza nei risultati al termine delle 4000 iterazioni assegnate.

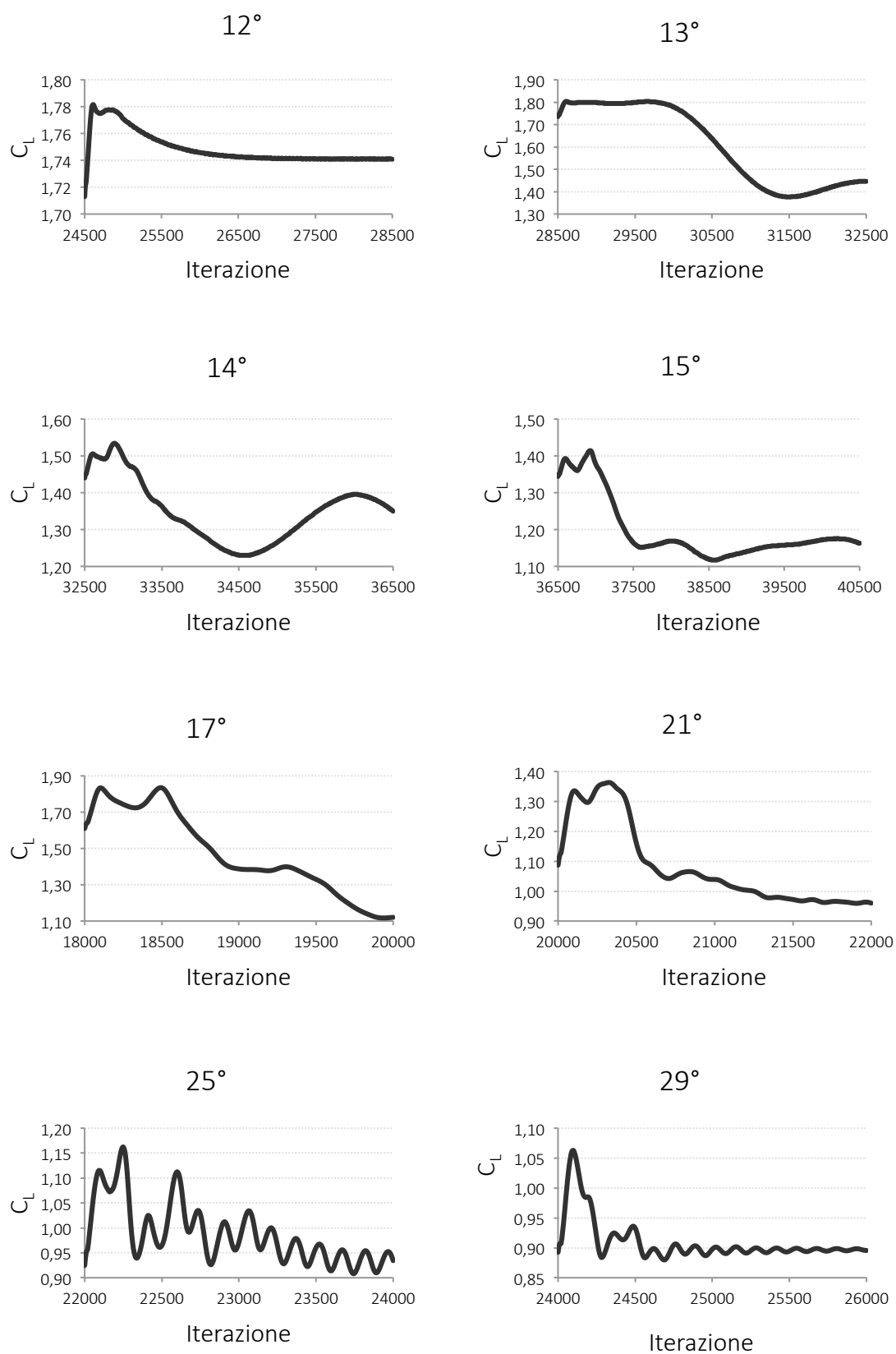


Fig. 5. 6

5.3 Polare

Per ognuna delle analisi CFD è stato estratto anche il valore del coefficiente di resistenza, rendendo possibile il tracciamento della polare aerodinamica della vela nella configurazione esaminata:

Incidenza [°]	C_L	C_D
-19	-0,25	0,037
-15	0,01	0,019
-11	0,27	0,022
-7	0,54	0,039
-3	0,82	0,072
1	1,10	0,12
5	1,38	0,18
7	1,51	0,22
9	1,62	0,25
10	1,67	0,27
11	1,72	0,29
12	1,74	0,31
13	1,41	0,34
14	1,31	0,35
15	1,16	0,38
17	1,12	0,44
21	0,96	0,47
25	0,93	0,56
29	0,90	0,63

Tab. 5. 2

Polare Aerodinamica (Flap 19°)

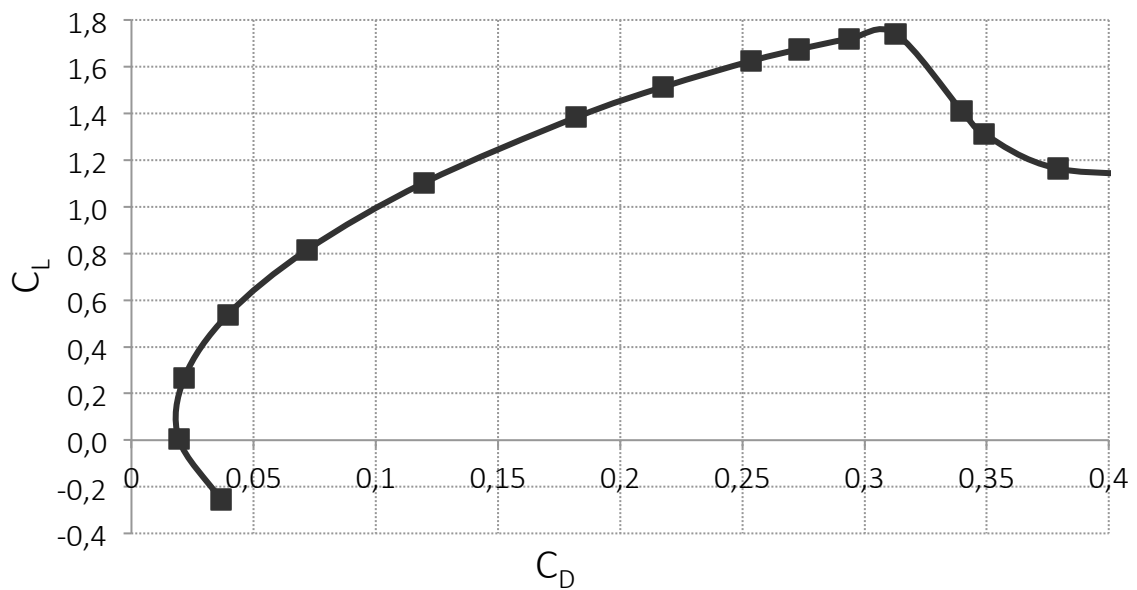


Fig. 5. 7

L'andamento è parabolico fino allo stallo, e a esso segue il crollo della portanza cui si accompagna un incremento della resistenza, principalmente legato alla dimensione trasversale della scia, che aumenta a seguito dell'estesa separazione dello strato limite.

Approssimazione Parabolica della Polare

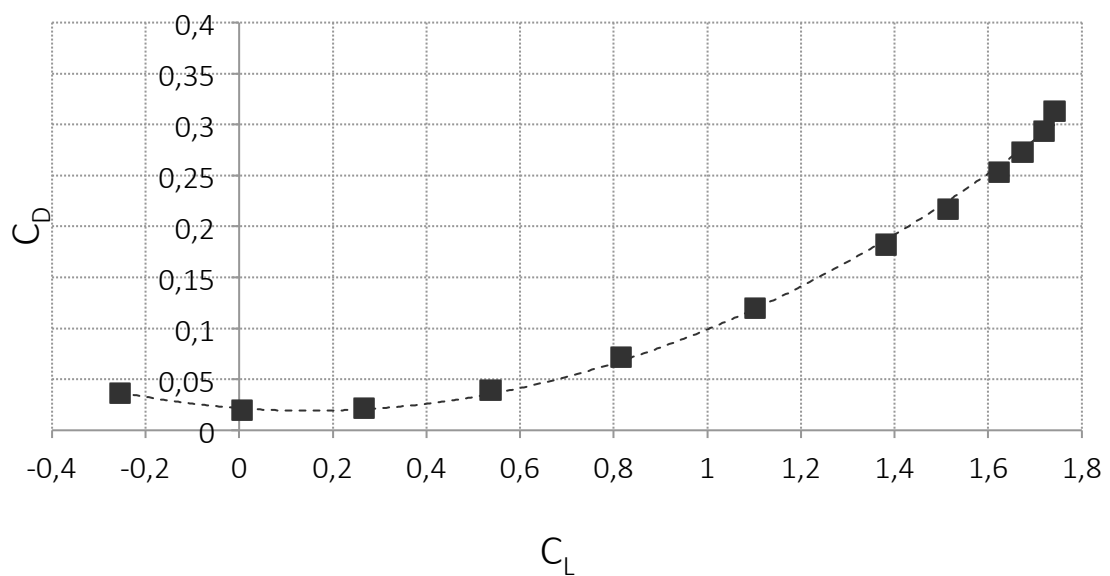


Fig. 5. 8

Per il calcolo del coefficiente di resistenza minimo e del coefficiente di portanza a esso associato si è scelto di ricorrere a una media dei risultati ottenibili attraverso l'interpolazione quadratica su tre punti contenenti l'intervallo di incidenze tra -15° e -11° , all'interno dei quali ci si aspetta il minimo.

È possibile desumere, con lo stesso criterio, il valore dell'efficienza massima, che in prima approssimazione ci si aspetta di registrare tra -11° e -7° di incidenza.

I risultati sono riassunti nella seguente tabella:

C_{D0}	$C_{L_{D0}}$	E_{\max}	$C_{L_{E_{\max}}}$	$\alpha_{id} [^\circ]$
0,018	0,10	14,1	0,43	-8,5

Tab. 5. 3

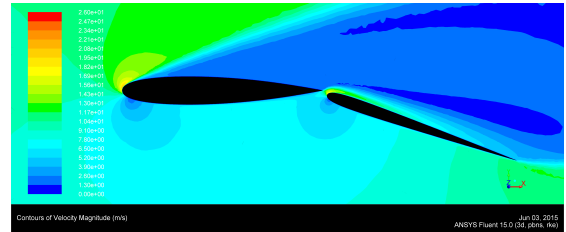
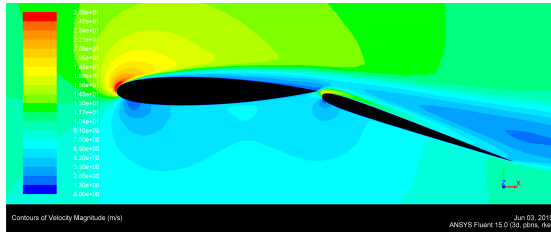
5.4 Stallo

Per meglio comprendere il meccanismo con il quale la vela rigida in esame va incontro al fenomeno dello stallo si è fatto ricorso ad alcune visualizzazioni di proprietà strettamente connesse con la separazione dello strato limite.

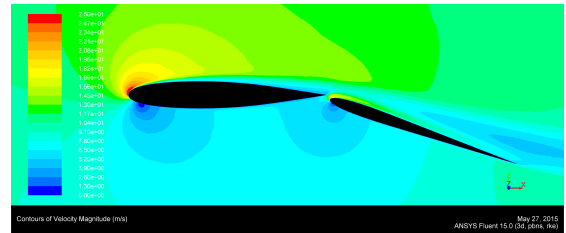
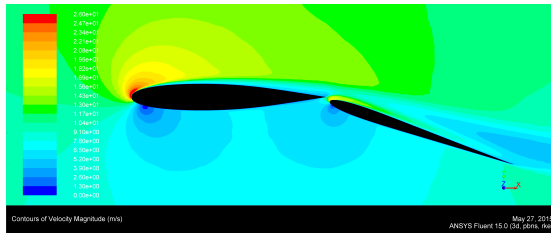
Innanzitutto, si sono analizzati i *plot* del modulo della velocità e della pressione totale per le incidenze in prossimità dello stallo, in corrispondenza di due sezioni della vela poste a diversa altezze. In particolare, sono stati presi in considerazione due piani, il primo nella metà inferiore della vela, a una altezza pari a 2,5 metri (1,9 metri dalla base della vela), e il secondo nella metà superiore, a una altezza di 5,6 metri (5 metri dalla base della vela); si è scelto di fare riferimento a dei piani posti a una discreta distanza dalle estremità per poter considerare trascurabili gli effetti locali dovuti alla finitezza del corpo.

12° 13° *Velocity Magnitude*

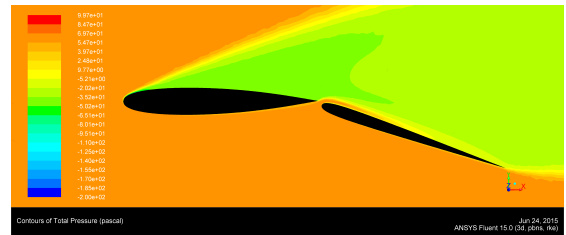
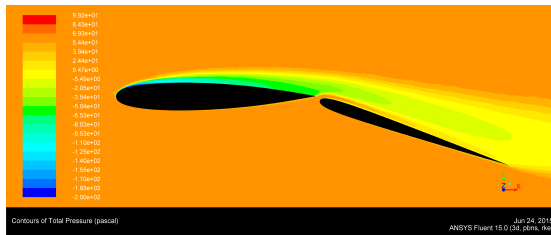
5,6 m



2,5 m

*Total Pressure*

5,6 m



2,5 m

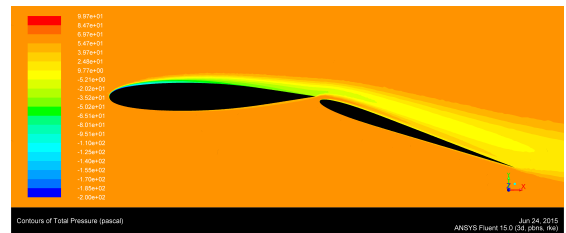
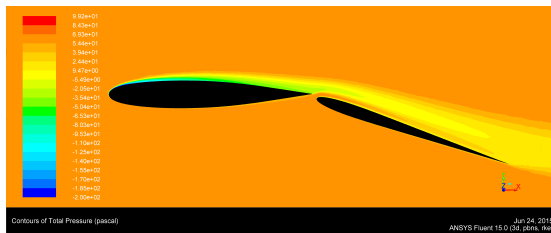


Fig. 5. 9

Appare evidente che il flusso nella sezione più bassa rimane attaccato anche spingendosi oltre il valore dell'incidenza di stallo, mentre ciò non accade nella sezione più in alto, dove la separazione è chiaramente riconoscibile in termini di aumento improvviso della dimensione della scia, che si può facilmente individuare come la zona in cui pressione totale e velocità assumono valori inferiori a quelli del flusso indisturbato. Inoltre, dall'andamento della pressione totale, in particolar modo, si nota che il soffiaggio sul flap continua a essere presente anche quando il flusso separa in maniera estesa.

È immediato desumere, pertanto, che la vela nelle condizioni di esame non stalli in maniera uniforme in apertura, ma tenda a manifestare lo stallo in una zona localizzata verso l'estremità superiore. A conferma di ciò sono si osservano le visualizzazioni degli sforzi tangenziali sulla superficie della vela, grazie alle quali è facilmente individuabile la porzione separata allo stallo.

Shear Stress

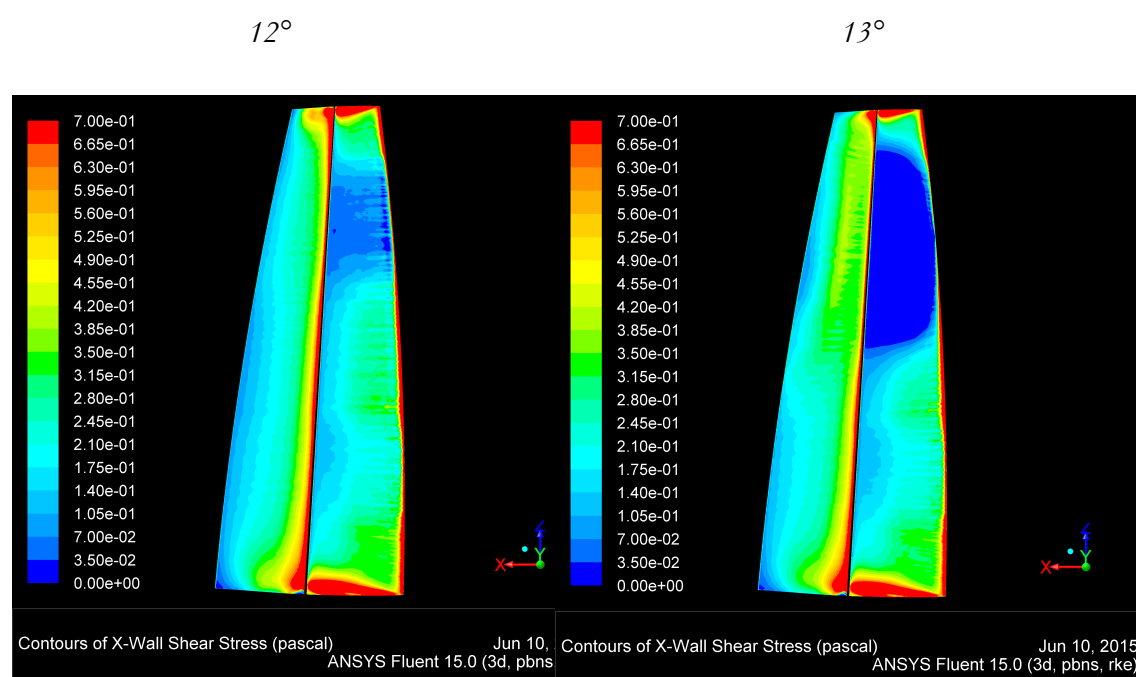


Fig. 5. 10

Si nota la presenza di una precisa zona sul dorso del *main* nella quale gli sforzi tangenziali si annullano e il flusso, quindi, separa. Sul *flap* il soffiaggio energizza il flusso in prossimità del dorso mantenendo un valore positivo degli sforzi nonostante l'estesa separazione.

Lo stallo di estremità osservato può trovare spiegazione in due modi:

1. I profili della vela sono uguali tra loro e lavorano nella medesima condizione e quindi hanno lo stesso valore del coefficiente di portanza massimo, ma la distribuzione di portanza in apertura non è costante e quindi i profili all'estremità stallano prima.
2. La distribuzione del coefficiente di portanza è pressoché costante in apertura, ma i profili all'estremità presentano un valore minore del C_L di stallo.

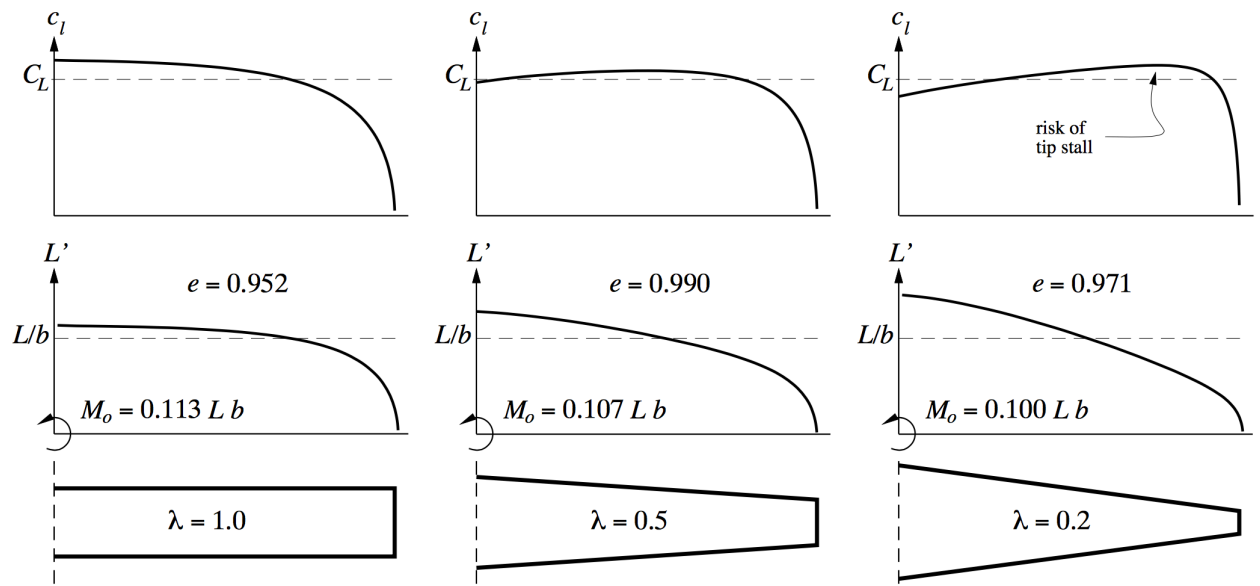


Fig. 5. 11

Una distribuzione del coefficiente di portanza con un picco all'estremità è tipica di ali fortemente rastremate, condizione che però non sarebbe verificata in questo caso, in cui la rastremazione della vela è pari a:

$$\lambda = \frac{c_{\text{tip}}}{c_{\text{root}}} = 0,46$$

Inoltre, non è possibile affermare a priori che i vari profili lavorino nelle stesse condizioni, poiché la diminuzione della corda implica anche una diminuzione del valore del numero di Reynolds locale, a causa del quale è ragionevole aspettarsi spessori dello strato limite maggiori nella parte superiore della vela - come confermato dalle immagini che rappresentano la pressione totale - e, conseguentemente, valori inferiori degli sforzi tangenziali e minore resistenza alla separazione del flusso (valori minori del coefficiente di portanza massimo).

A verifica di tali ipotesi sono stati ricavati i valori del coefficiente di portanza a varie altezze della vela per un'incidenza di 12° tramite integrazione del coefficiente di pressione sui profili.

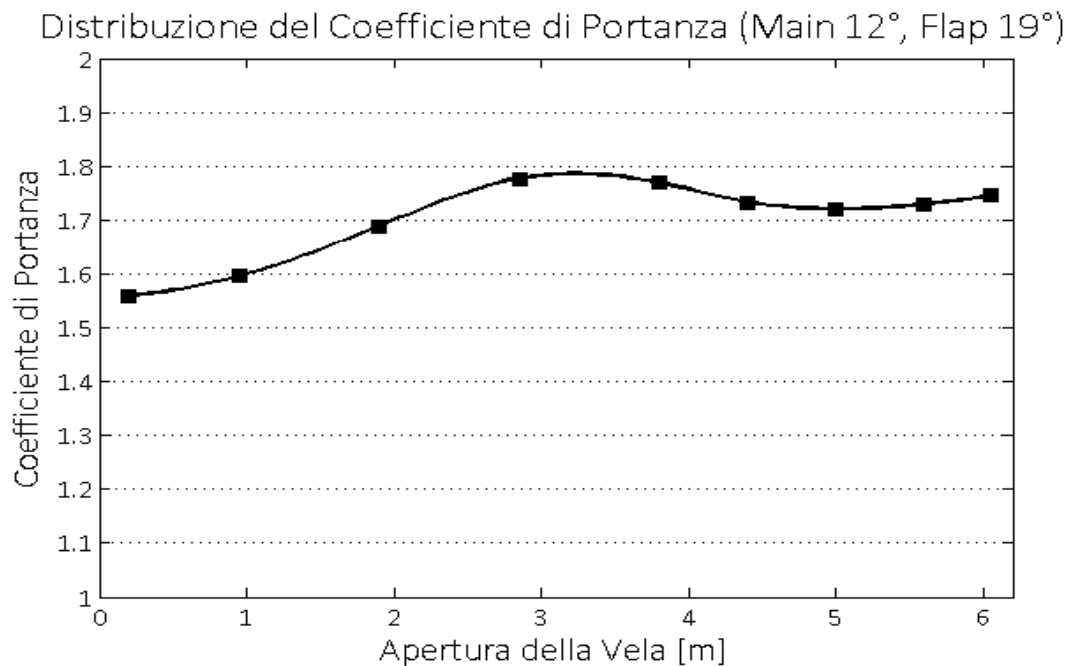


Fig. 5. 12

Come previsto, non si evidenzia la presenza di un picco nel coefficiente di portanza nella zona dove il flusso separa (tra 3,2 m e 5,6 m di apertura indicativamente). In prossimità delle due estremità, invece, si riscontra un aumento molto localizzato della portanza, probabilmente dovuto all'effetto dei vortici di estremità, che si vedranno arrotondarsi sul dorso in corrispondenza delle sezioni più esterne. L'effetto è, comunque, piuttosto circoscritto, dal momento che, come attesta il grafico appena mostrato, già a una distanza di 20 cm dalla base e di 15 cm dalla punta gli effetti non sembrano risentirsi.

5.5 Effetto del flap

Effetto sulla curva $C_L-\alpha$

A seguito della caratterizzazione del profilo in una configurazione avente angolo di deflessione fissato, sono state eseguite aggiuntive simulazioni allo scopo di caratterizzare il comportamento della vela in risposta a una variazione di assetto del flap.

Si riporta, innanzitutto, l'effetto di tale parametro sulla curva di portanza:

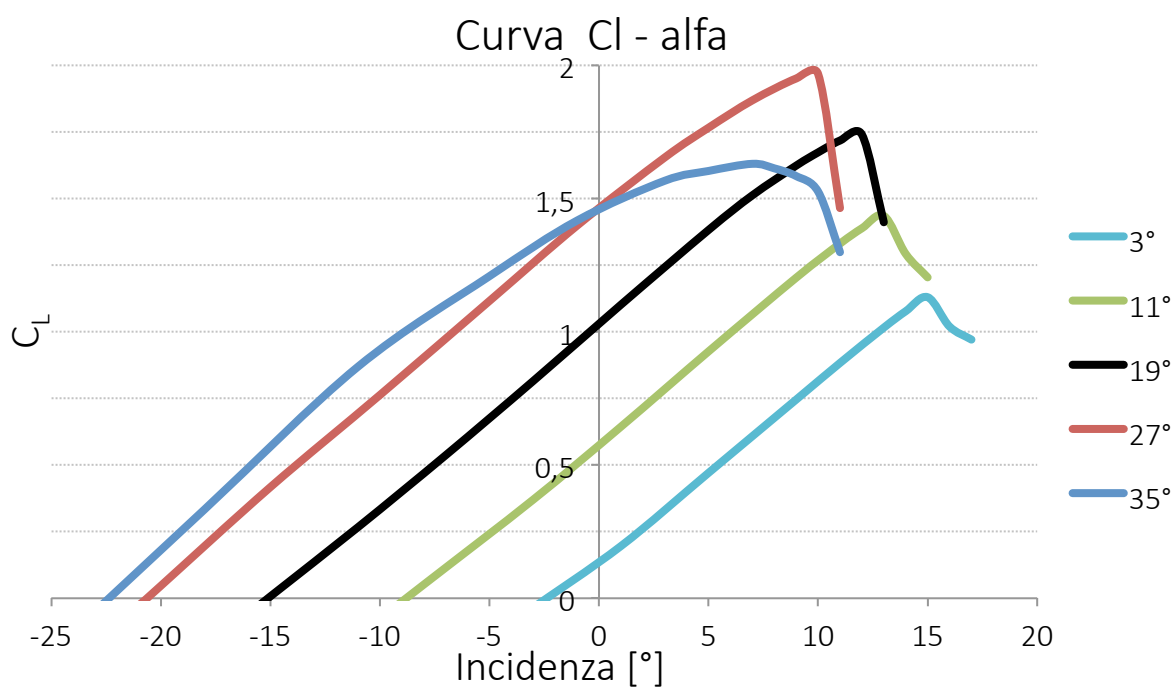


Fig. 5. 13

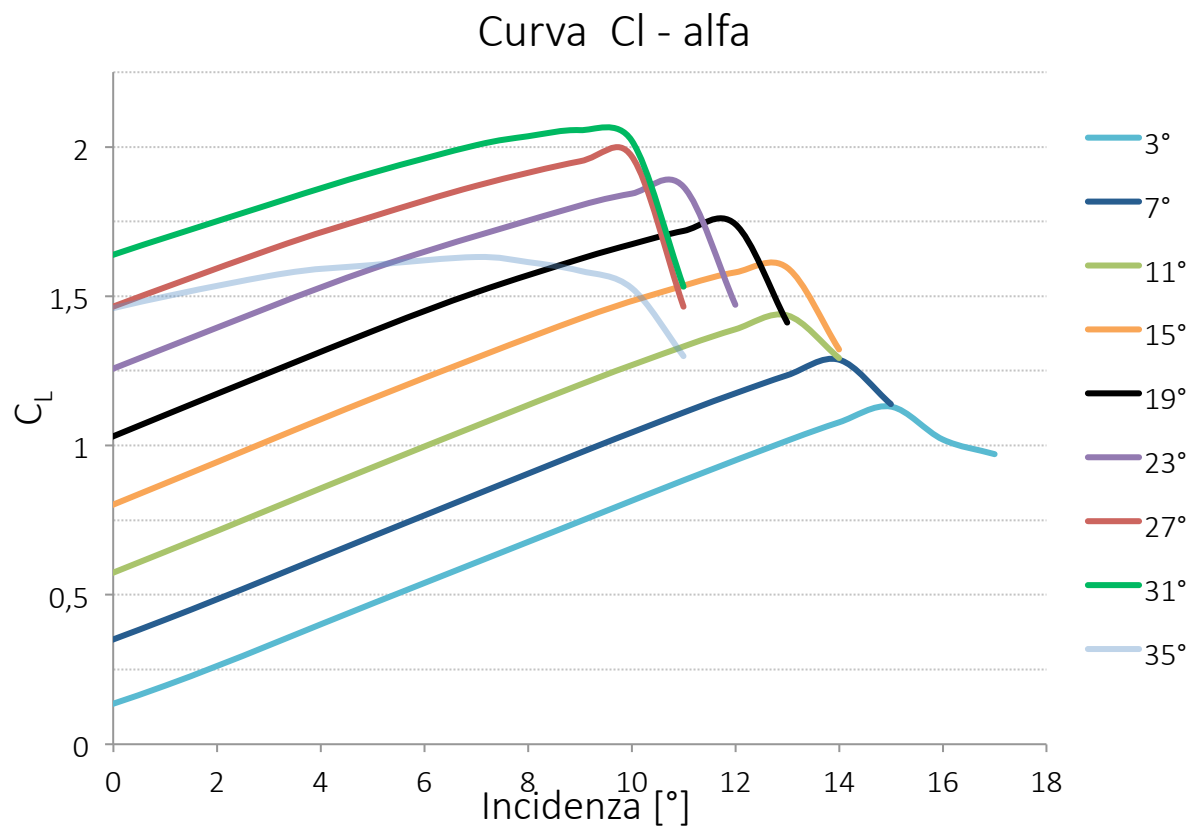


Fig. 5. 14

L'aumento della deflessione del flap comporta un aumento del coefficiente di portanza massimo raggiungibile fino a un'incidenza compresa tra 31° e 35° . In quest'ultimo caso, infatti, la portanza raggiungibile cala e le simulazioni faticano a convergere anche per valori dell'incidenza del *main* elevate.

Di seguito si riportano le principali caratteristiche delle configurazioni esaminate in merito alla generazione di portanza:

	3°	7°	11°	15°	19°	23°	27°	31°
C_{La}	0,063	0,062	0,064	0,064	0,065	0,069	0,074	0,082
α_0	$-2,4^\circ$	$-5,7^\circ$	$-8,8^\circ$	$-12,0^\circ$	$-15,1^\circ$	$-18,2^\circ$	$-20,6^\circ$	$-22,6^\circ$
C_{Lmax}	1,13	1,29	1,44	1,60	1,74	1,87	1,97	2,06

Tab. 5. 4

La pendenza della curva di portanza non varia sensibilmente fino a valori della deflessione elevati, vicini al limite di utilizzo della vela e, come già osservato, appaiono in ottimo accordo con la teoria di Prandtl della linea portante, per quanto quest'ultima sia molto semplificata.

L'incidenza di portanza nulla cala in modo pressoché lineare con l'aumentare della deflessione del flap, mostrandosi perfettamente in accordo con il comportamento tipico dei profili aerodinamici all'aumentare della curvatura.

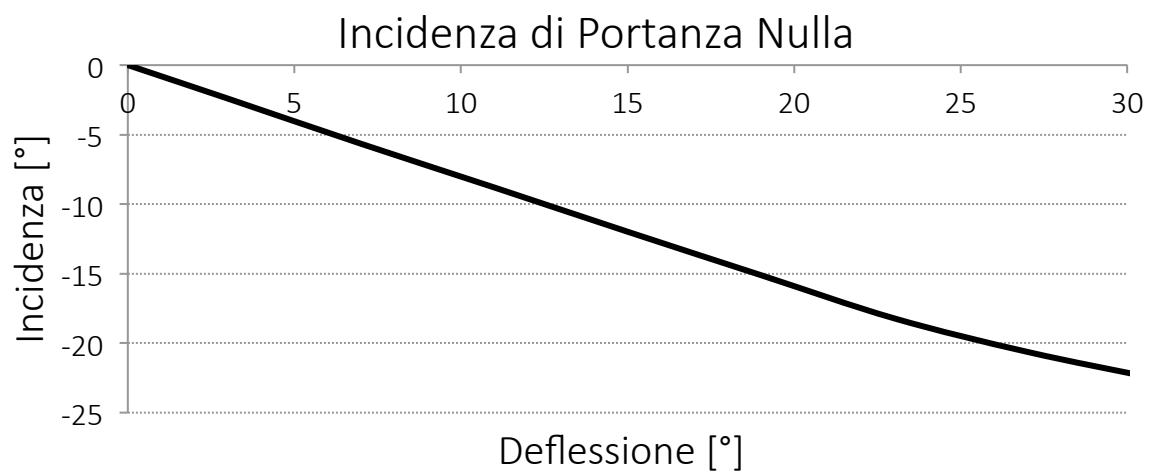


Fig. 5. 15

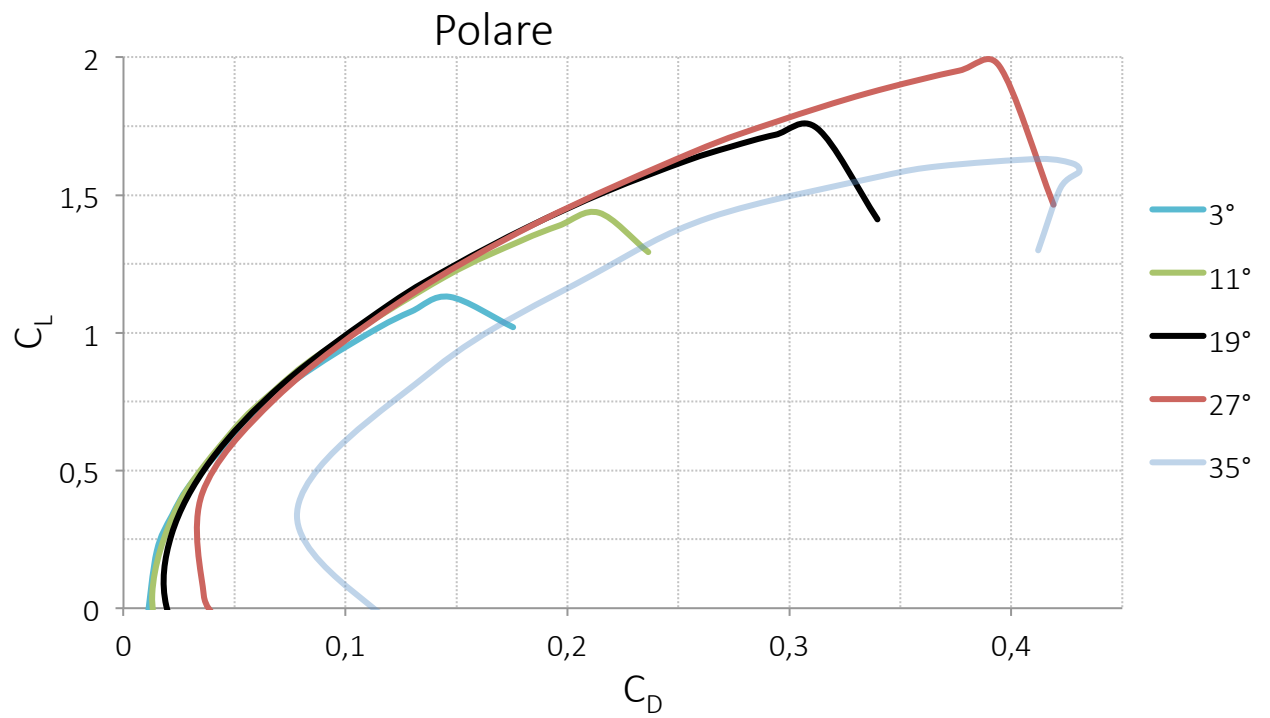
Effetto sulla polare

Fig. 5. 16

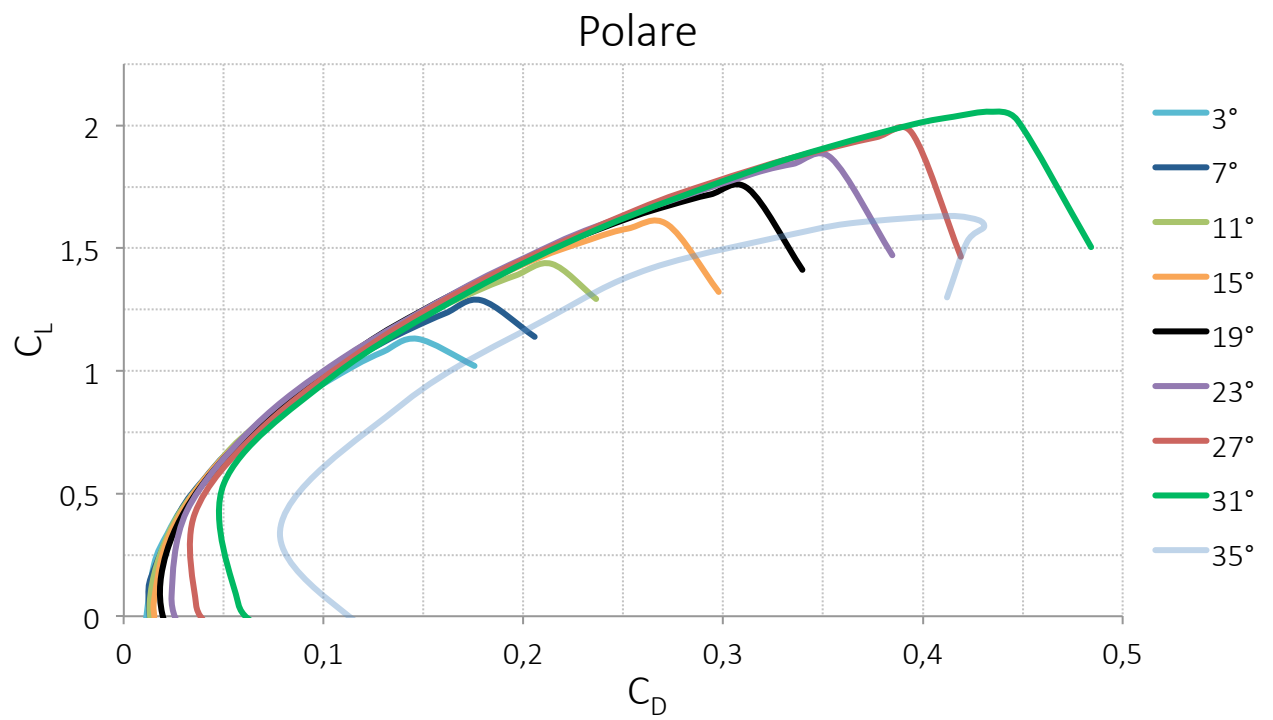


Fig. 5. 17

	3°	7°	11°	15°	19°	23°	27°	31°
C_{D0}	0,011	0,012	0,013	0,015	0,018	0,023	0,031	0,044
C_{LCdmin}	0,00	0,01	0,02	0,05	0,10	0,16	0,24	0,34
E_{max}	15,5	15,5	15,2	14,7	14,1	13,7	12,2	11,0
C_{LEmax}	0,34	0,34	0,37	0,40	0,44	0,48	0,53	0,61
α_{id}	3,0°	-0,2°	-3,0°	-5,9°	-8,5°	-11,3°	-13,4°	-15,0°

Tab. 5. 5

Il valore minimo del coefficiente di resistenza e il valore del coefficiente di portanza in corrispondenza del quale esso si presenta crescono con la deflessione del flap, anche in questo caso in perfetto accordo con la teoria dei profili curvi.

L'efficienza massima, invece, si mostra calante con la deflessione, probabilmente a causa della necessità di operare con profili simmetrici, che presentano il punto di massima curvatura in posizione non ottimizzata per le configurazioni a *flap* deflesso.

Anche l'incidenza ideale, così come quella di portanza nulla, cala circa linearmente con la deflessione, mentre il coefficiente di portanza di efficienza massima cresce leggermente.

Effetto sullo stallo

L'osservazione della curva di portanza a diversi valori della deflessione del *flap* fornisce già una prima idea sul fatto che il meccanismo che porta allo stallo e il fenomeno stesso possano essere differenti nei diversi assetti. In particolare, la prima evidenza che può essere colta è che, mano a mano che la deflessione aumenta, il crollo del coefficiente di portanza conseguente al fenomeno dello stallo è sempre più marcato, e quindi l'estesa separazione si manifesta in maniera sempre più improvvisa.

Per confrontare i diversi casi, e valutarne le differenze sono state prese in considerazione le configurazioni a 3° e a 31° di deflessione in confronto a quella precedentemente analizzata a 19° , in modo da comprendere i valori estremi tra quelli per cui erano state eseguite le simulazioni, e studiarne il comportamento prima e dopo il decadimento delle proprietà aerodinamiche.

Innanzitutto, si mostrano le visualizzazioni degli sforzi tangenziali sul dorso della vela nelle tre configurazioni descritte.

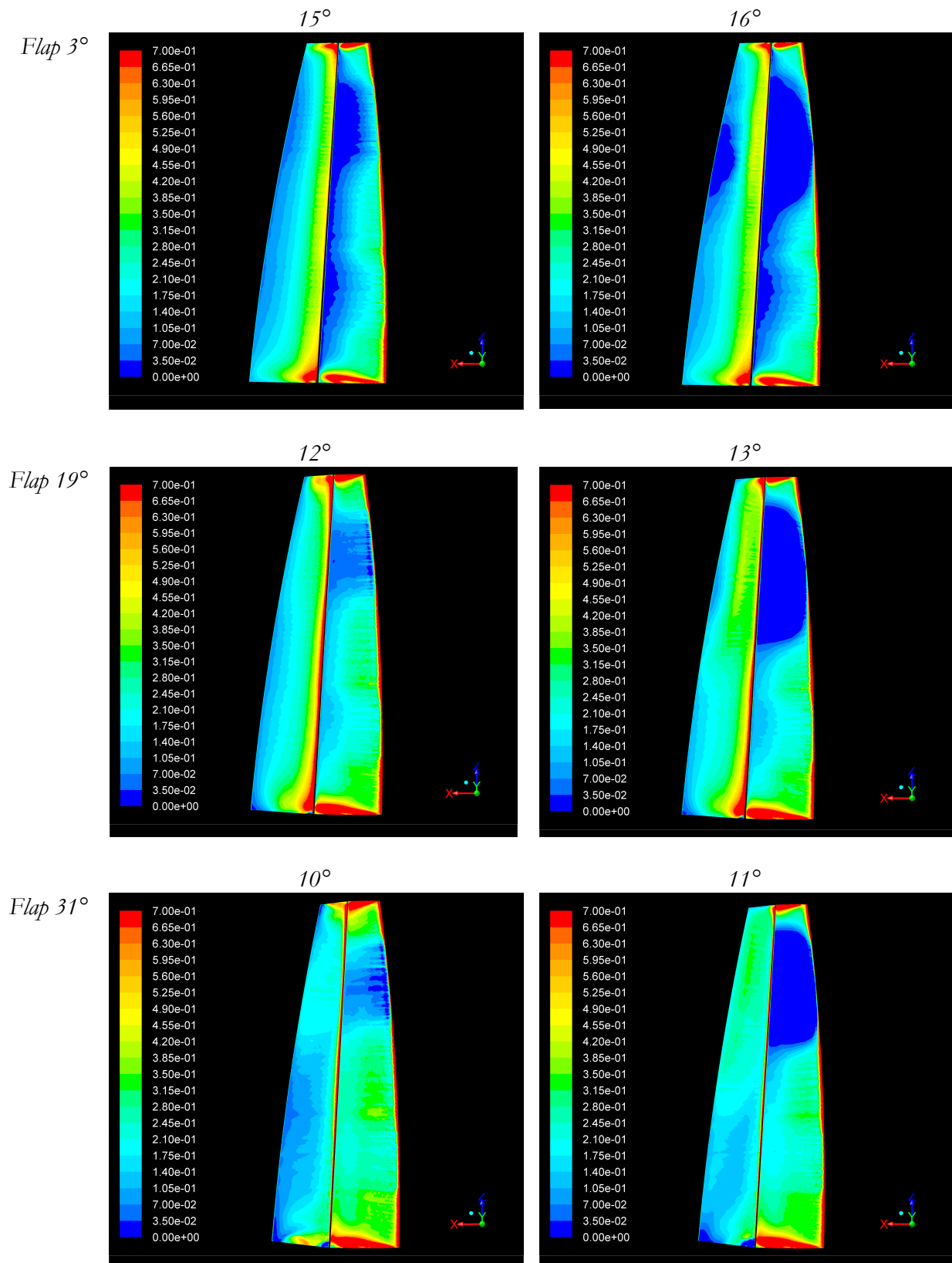
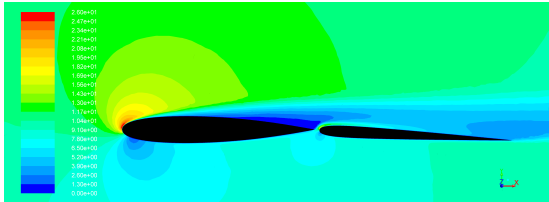
Shear Stress

Fig. 5. 18

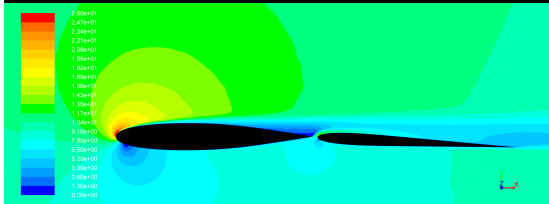
Dalle immagini appena mostrate è possibile trarre le seguenti osservazioni:

1. la zona di separazione sul *main* in corrispondenza dello stallo appare sempre più circoscritta mano a mano che la deflessione aumenta. In particolare nella configurazione a 3° sembra esserci allo stallo una zona separata anche nella parte inferiore della vela, mentre a 31° la zona separata appare molto circoscritta verso l'estremità;
2. nel caso a 3° di deflessione lo stallo sembra avere origine dal bordo d'uscita del *main*, e si manifesta in modo graduale: già in corrispondenza dell'incidenza di massima portanza appare una zona dove gli sforzi tangenziali sono nulli, seppure questa sia ovviamente inferiore a quella presente nel caso effettivamente stallato;
3. nel caso a 31° invece sembra che si formino delle piccole zone separate vicino al bordo d'attacco del *main* che potrebbero indicare la presenza di piccole bolle di separazione, e il cambiamento negli sforzi tangenziali da prima a dopo lo stallo appare molto netto;
4. sempre in quest'ultimo caso, gli sforzi tangenziali sul *flap* appaiono piuttosto bassi già prima dello stallo, perfettamente in accordo con il fatto che 31° di deflessione del *flap* sono vicini al valore limite per il quale il flusso non riesce a restare attaccato ad esso nemmeno per bassissimi valori dell'incidenza.

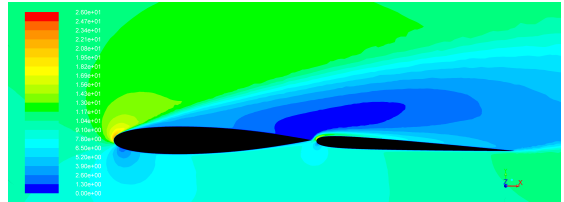
Alcune conferme di tali considerazioni possono essere ottenute andando a osservare le visualizzazioni della pressione totale e del campo di velocità nei diversi casi.

*Velocity Magnitude**Flap 3°**5,6 m*

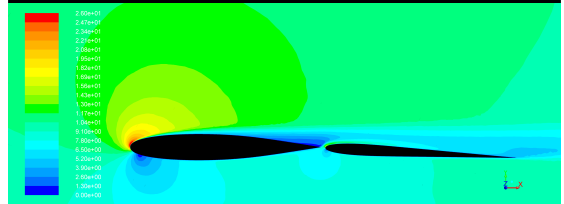
Contours of Velocity Magnitude (m/s) Jul 05, 2015 ANSYS Fluent 15.0 (64-bit, 64)

2,5 m

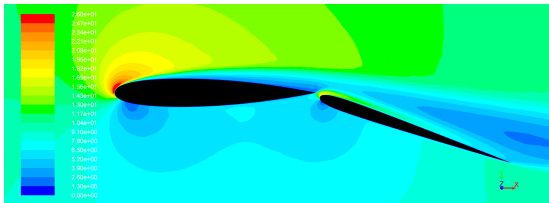
Contours of Velocity Magnitude (m/s) Jul 05, 2015 ANSYS Fluent 15.0 (64-bit, 64)



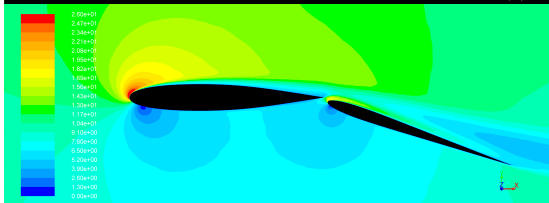
Contours of Velocity Magnitude (m/s) Jul 05, 2015 ANSYS Fluent 15.0 (64-bit, 64)



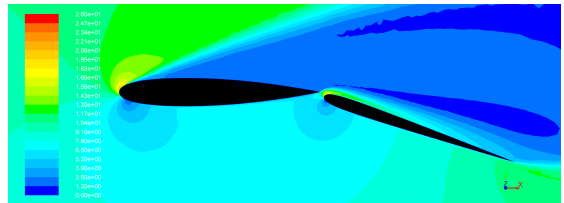
Contours of Velocity Magnitude (m/s) Jul 05, 2015 ANSYS Fluent 15.0 (64-bit, 64)

*Flap 19°**5,6 m*

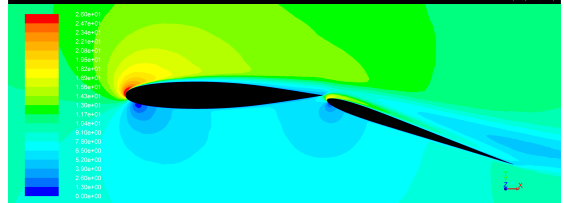
Contours of Velocity Magnitude (m/s) Jun 10, 2015 ANSYS Fluent 15.0 (64-bit, 64)

2,5 m

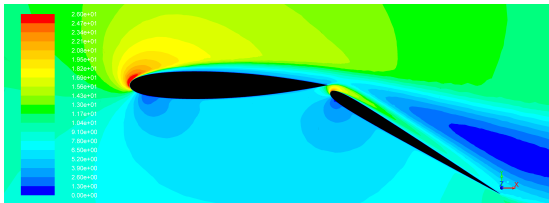
Contours of Velocity Magnitude (m/s) May 27, 2015 ANSYS Fluent 15.0 (64-bit, 64)



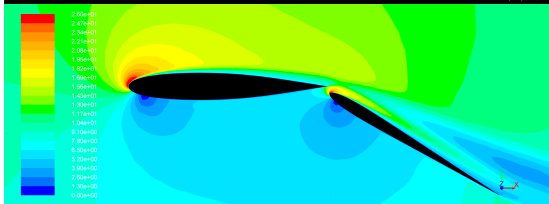
Contours of Velocity Magnitude (m/s) Jun 10, 2015 ANSYS Fluent 15.0 (64-bit, 64)



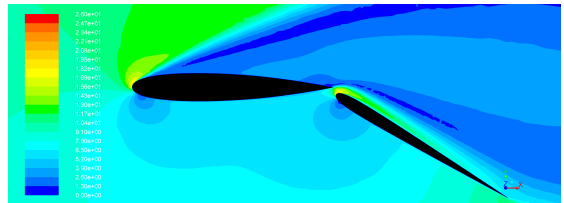
Contours of Velocity Magnitude (m/s) May 27, 2015 ANSYS Fluent 15.0 (64-bit, 64)

*Flap 31°**5,6 m*

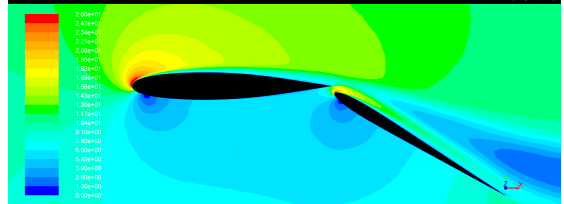
Contours of Velocity Magnitude (m/s) Jul 09, 2015 ANSYS Fluent 15.0 (64-bit, 64)

2,5 m

Contours of Velocity Magnitude (m/s) Jul 10, 2015 ANSYS Fluent 15.0 (64-bit, 64)



Contours of Velocity Magnitude (m/s) Jul 10, 2015 ANSYS Fluent 15.0 (64-bit, 64)



Contours of Velocity Magnitude (m/s) Jul 10, 2015 ANSYS Fluent 15.0 (64-bit, 64)

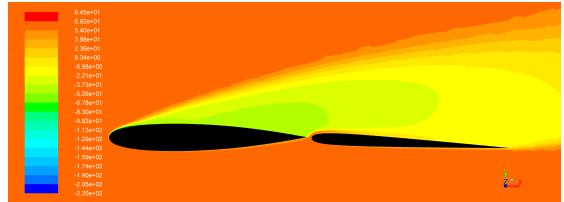
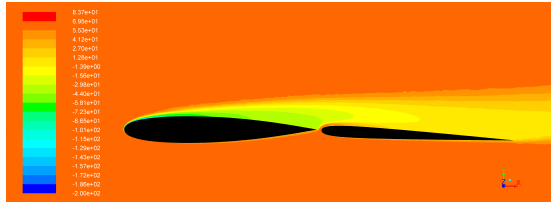
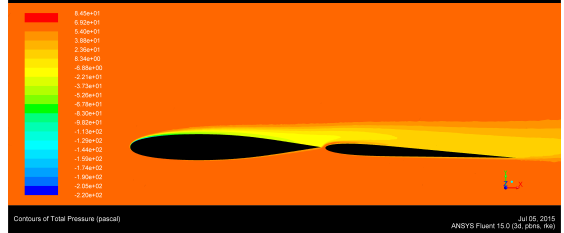
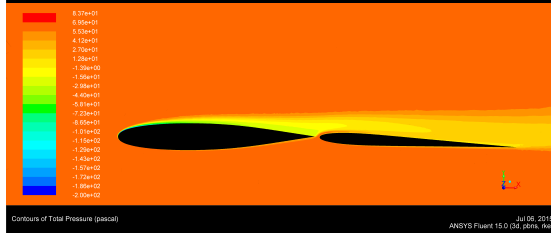
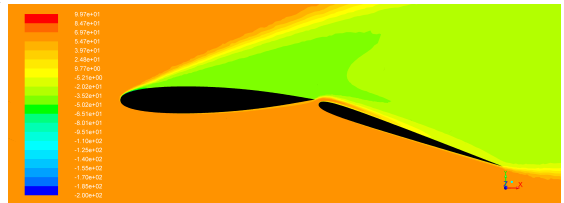
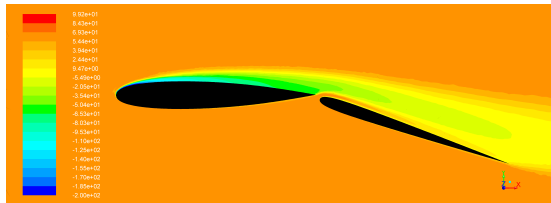
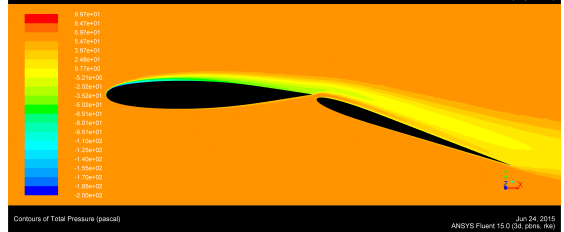
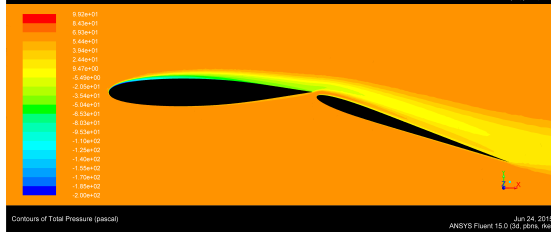
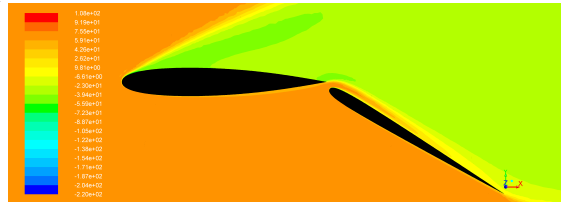
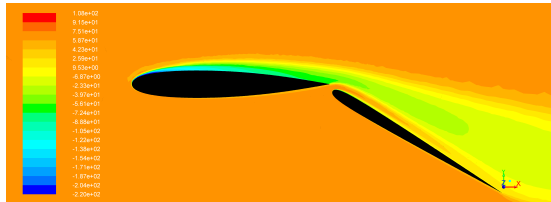
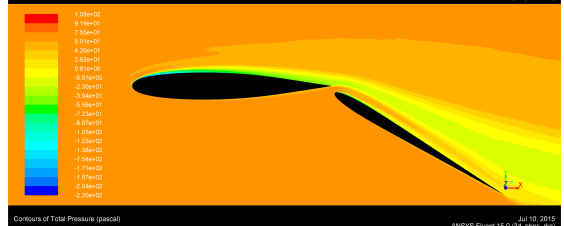
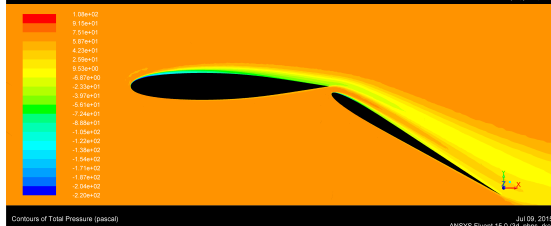
*Total Pressure**Flap 3°**5,6 m**2,5 m**Flap 19°**5,6 m**2,5 m**Flap 31°**5,6 m**2,5 m*

Fig. 5. 19

Nell'assetto con 3° di deflessione del *flap* è possibile notare dal grafico della velocità la presenza di una zona di separazione in corrispondenza del bordo d'uscita del *main* sia a 5,6 metri di altezza dalla base del dominio sia, anche se in misura ridotta, a 2,5 metri. Si può notare, inoltre, che in questo caso la variazione nella dimensione della scia a cavallo dello stallo è, sebbene evidente, maggiormente ridotta e sintomo anch'essa di uno stallo più graduale.

Curva C_L - δ

Dai dati ottenuti dalle simulazioni CFD è stato possibile tracciare le curve del coefficiente di portanza al variare della deflessione del *flap* per un valore costante dell'incidenza.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per due valori dell'incidenza pari a 3° e 11° .

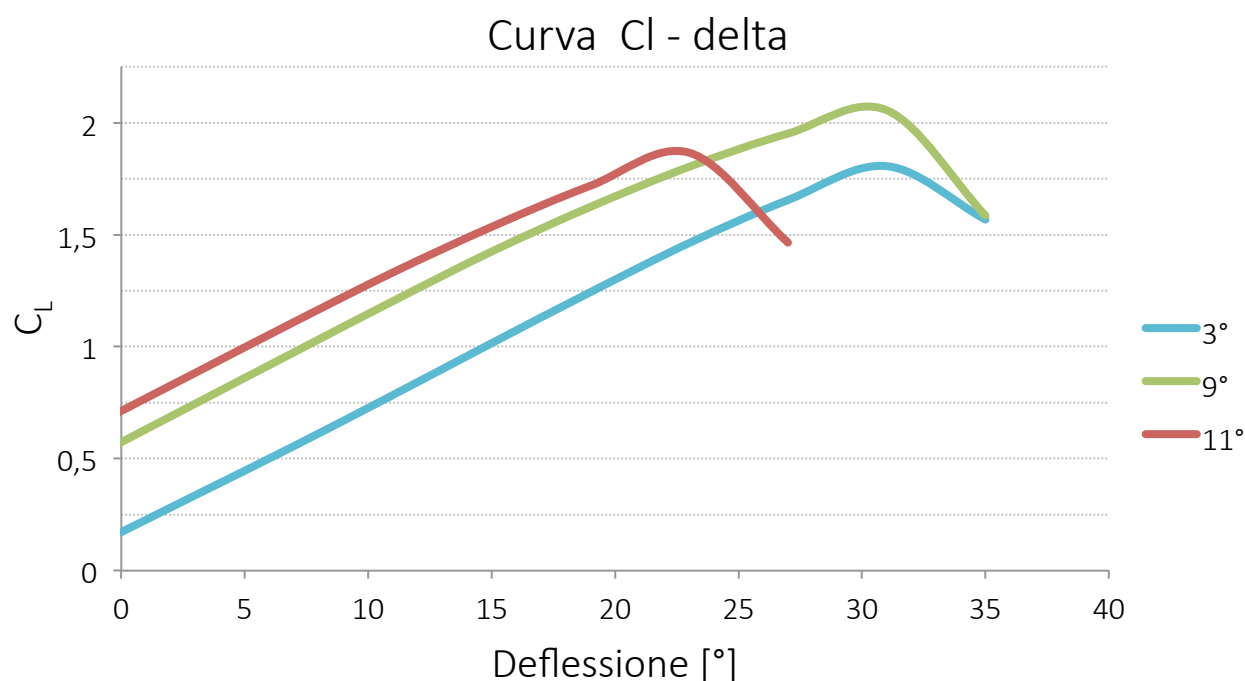


Fig. 5. 20

Anche in questo caso la pendenza non sembra subire particolari variazioni oscillando tra circa 0,055 per il caso a 3° di incidenza e circa 0,057 a 11° . Dal momento che a 35° di deflessione il flusso in nessun caso riesce a stare attaccato sul *flap*, è chiaro che nella curva tracciata al di sotto dei 9° di incidenza (valore massimo per 31° di deflessione) il valore della deflessione di

stallo appare invariato. In una trattazione più precisa si infittirebbe la curva eseguendo alcune simulazioni per angoli di deflessione compresi tra 31° e 35° .

Per valori superiori dell'incidenza, invece, sia la deflessione di stallo e il coefficiente di portanza massimo calano.

Stallo di flap

A questo punto si è voluto indagare in merito a eventuali differenze che possono intercorrere tra le tipologie di stallo viste in precedenza e la modalità di stallo a incidenza fissata dovuta alla variazione della deflessione.

Sono stati analizzati i casi a 3° e 11° di incidenza del *main* andando ad osservare innanzitutto i grafici rappresentanti gli sforzi tangenziali sul dorso della vela:

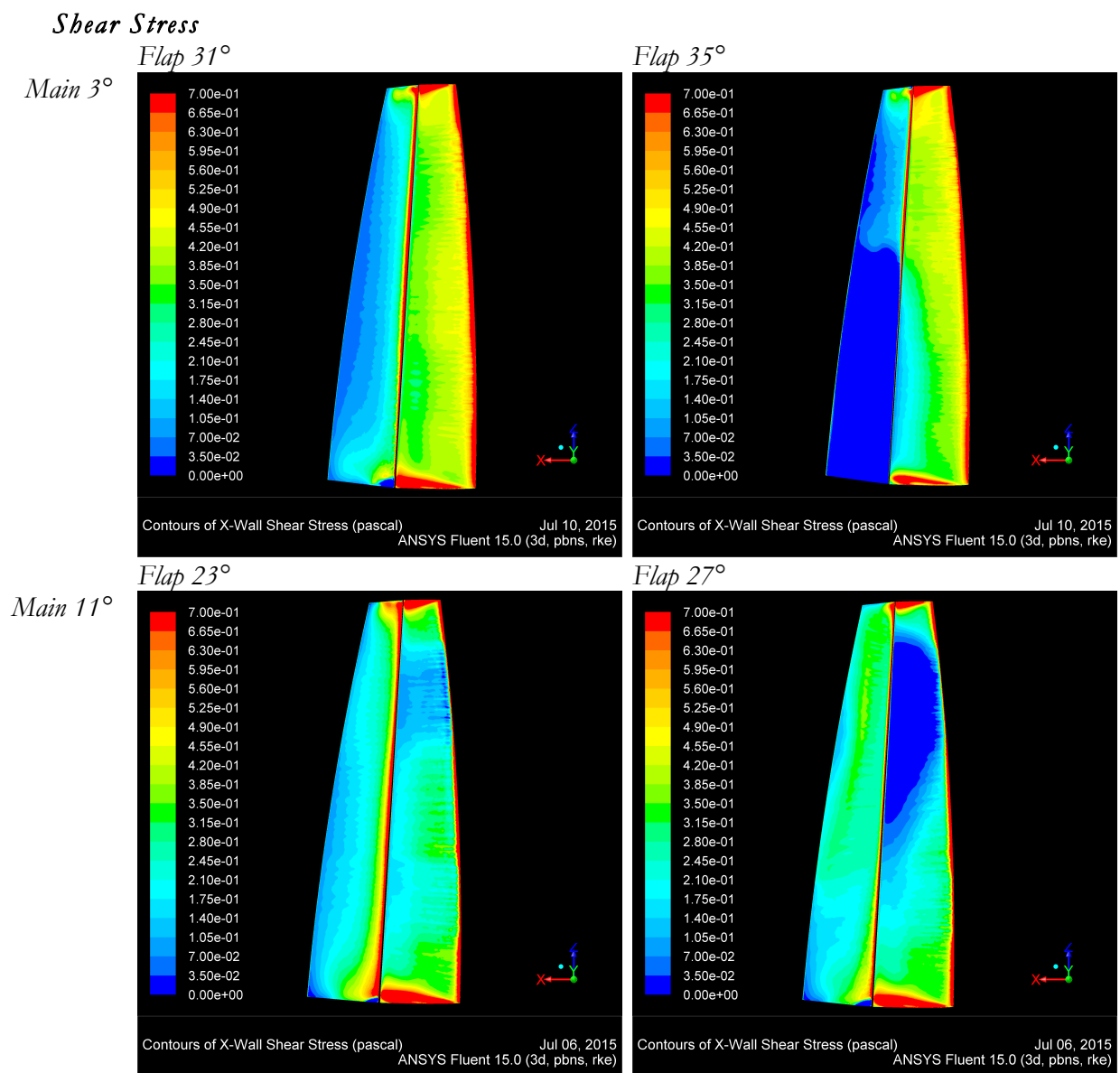


Fig. 5. 21

In questo caso è possibile fare le seguenti osservazioni:

1. Nel caso di 3° di incidenza lo stallo del *flap* interessa la parte inferiore della vela, e questo può risultare problematico per la navigazione soprattutto nelle andature montanti dal momento che il centro di applicazione della forza sbandante si può spostare verso l'alto aumentandone il braccio e il rischio di scuffiata. Per quanto detto in precedenza riguardo alla distribuzione del coefficiente di portanza massimo che ci si aspetterebbe in apertura, questa tipologia di stallo potrebbe apparire di non immediata comprensione. Una possibile spiegazione risiede nella possibilità che la forma del *flap* o quella del *gap* non siano realmente uniformi su tutta l'apertura.
2. Si nota, anche, come la vela principale si trovi ad avere un angolo di attacco abbastanza basso da non risentire quasi minimamente della variazione di deflessione del *flap*, almeno fino a quando la turbolenza causata dall'estesa separazione del flusso non comincia a interessare anche il bordo d'uscita adiacente ad essa.
3. A 11° di incidenza, invece, lo stallo appare decisamente più simile a quello visto al variare dell'incidenza, dal momento che non si tratta di un vero e proprio stallo di *flap*, in corrispondenza del quale il soffiaggio continua a mantenere il flusso abbastanza attaccato, ma piuttosto di uno stallo del *main* causato dall'aumento di "curvatura" dei profili.

Anche in questo caso si riportano le visualizzazioni della pressione totale e della velocità, a conferma delle osservazioni compiute.

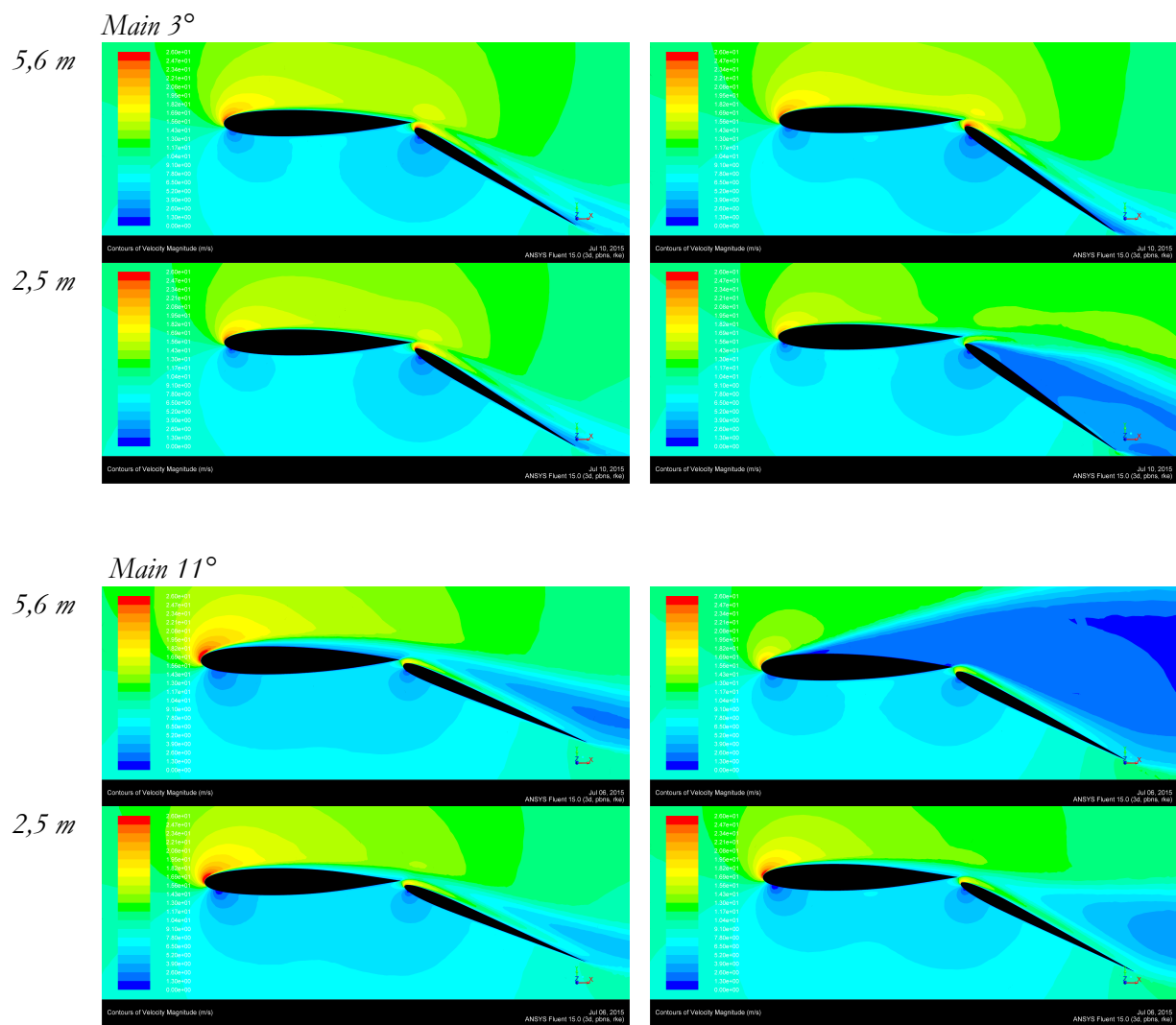
Velocity Magnitude

Fig. 5. 22

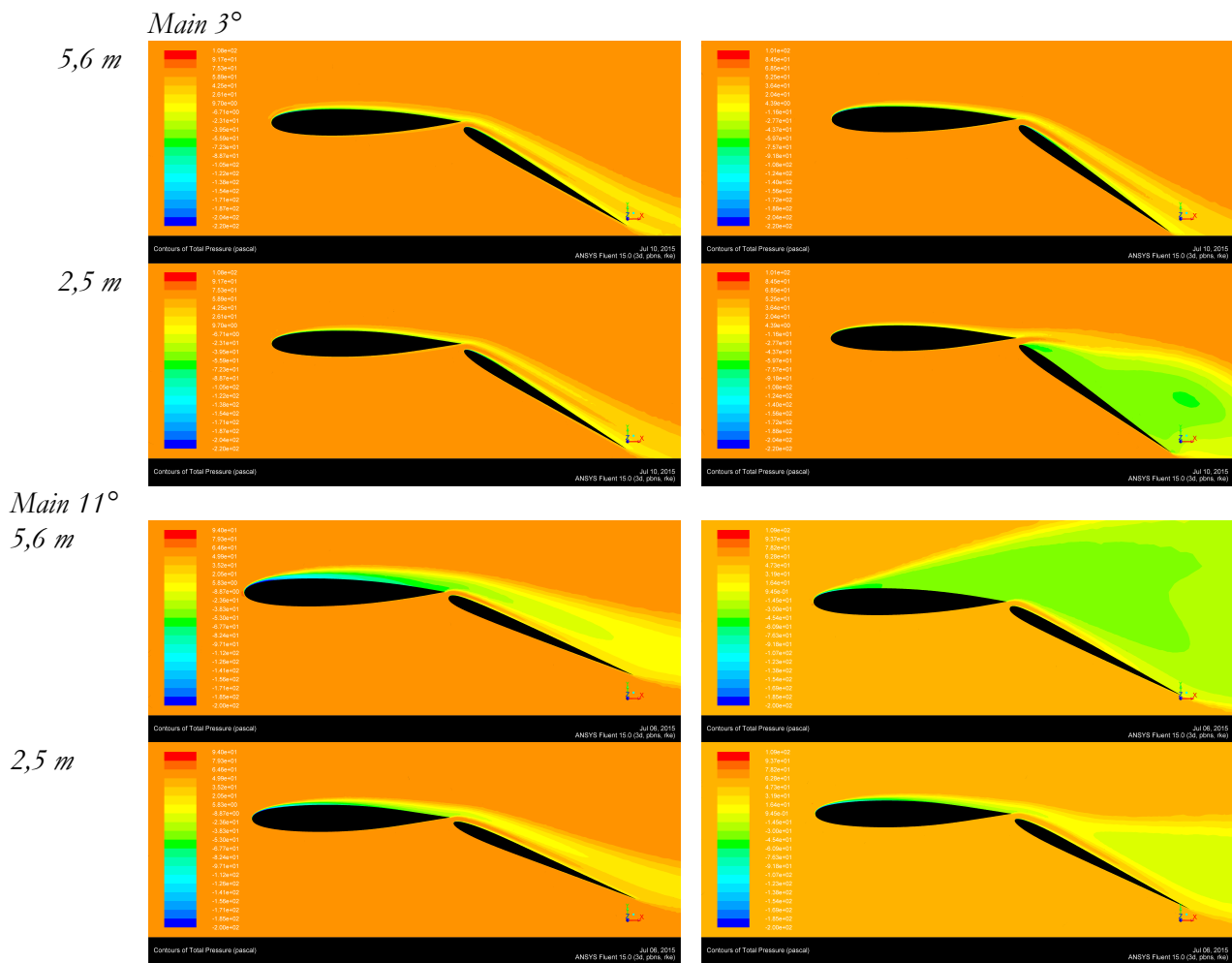
Total Pressure

Fig. 5. 23

Lo stallo che si manifesta nel caso di bassa incidenza avviene nella metà inferiore della vela. A questo proposito, è possibile notare che il profilo del *flap* possiede una maggiore curvatura del naso geometrico nella sezione inferiore rispetto a quella superiore, e questo può essere la spiegazione del fatto che in questa posizione il flusso proveniente dal soffiaggio faccia più fatica a seguire il contorno del naso del *flap* fino ad arrivare a separare.

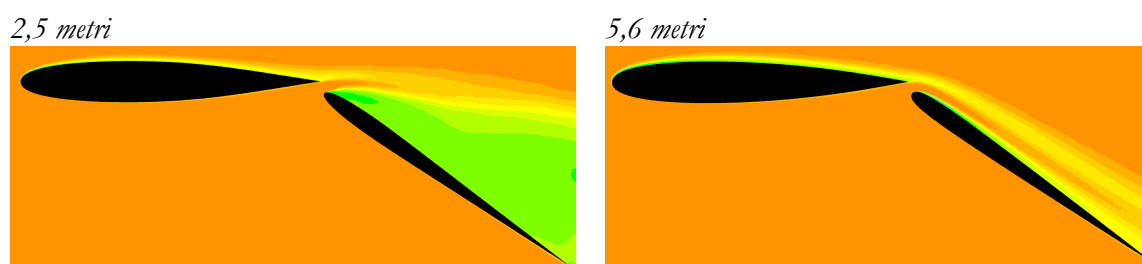


Fig. 5. 24

5.6 Effetto dello svergolamento sullo stallo

A questo punto del lavoro sono state effettuate alcune simulazioni imponendo uno svergolamento della vela secondaria non nullo. In particolare, con uno svergolamento positivo pari a 10° la deflessione del *flap* varia linearmente dalla base, dove è stata posta pari a 19° , alla cima, dove sarà pari a 9° .

L'utilizzo dello svergolamento trova il suo scopo nel contrastare l'effetto del gradiente della velocità del vento reale dovuto allo strato limite terrestre, che fa sì che il vento apparente investa il *main* con incidenza variabile lungo l'apertura.

In questo caso, in cui l'andamento del profilo del vento reale non è stato preso in considerazione, l'obiettivo di questa analisi è quello di indagare l'influenza data dalla variazione di questo grado di libertà, finora non considerato, sullo stallo della vela.

Per questo motivo sono stati studiati solo i valori dell'incidenza nell'intorno di quello che ci si aspettava sarebbe stato il valore massimo precedente allo stallo.

Si riporta, pertanto, il tratto di curva di portanza tracciato:

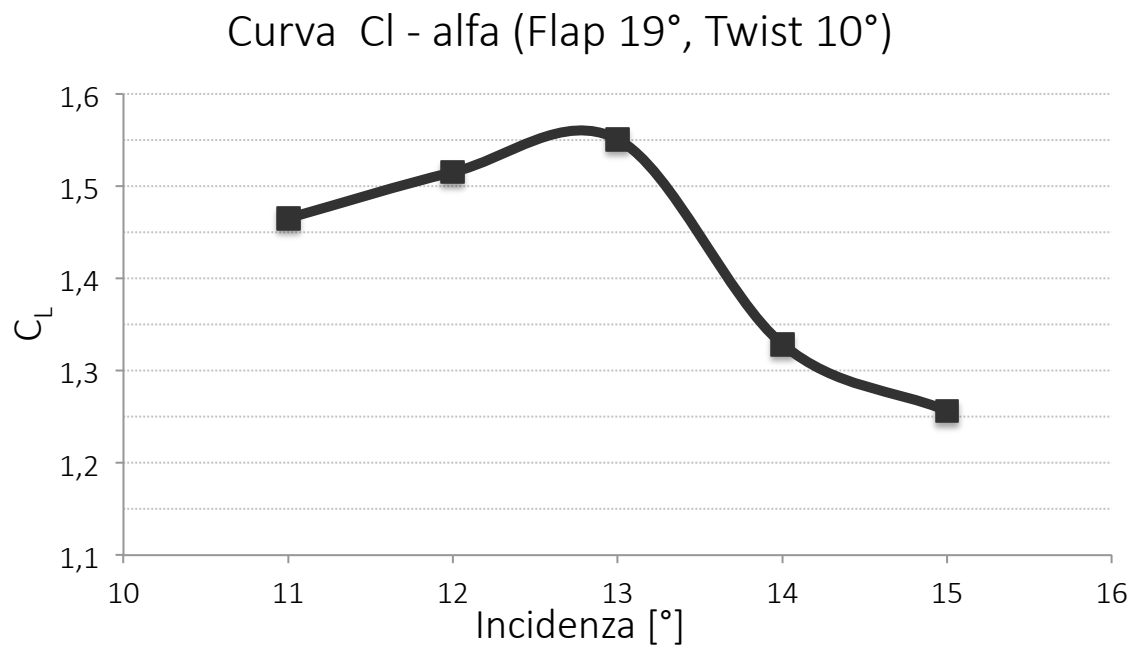


Fig. 5. 25

Come era ragionevole aspettarsi, rispetto al caso avente svergolamento nullo si ha una diminuzione del coefficiente di portanza raggiunto e un aumento dell'incidenza di stallo.

A questo punto è possibile vedere le visualizzazioni relative allo stallo in questa configurazione esaminata:

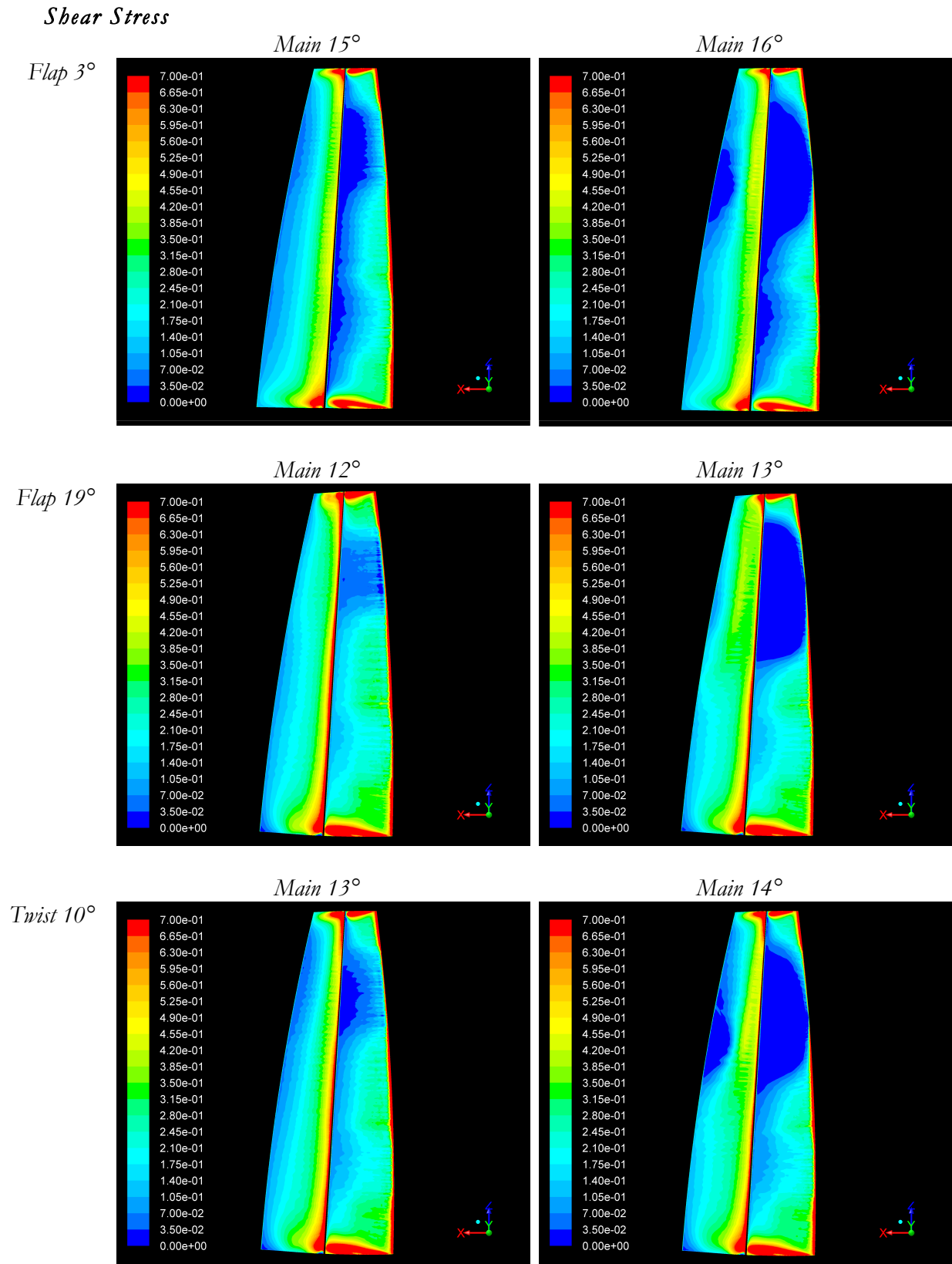


Fig. 5. 26

Velocity Magnitude

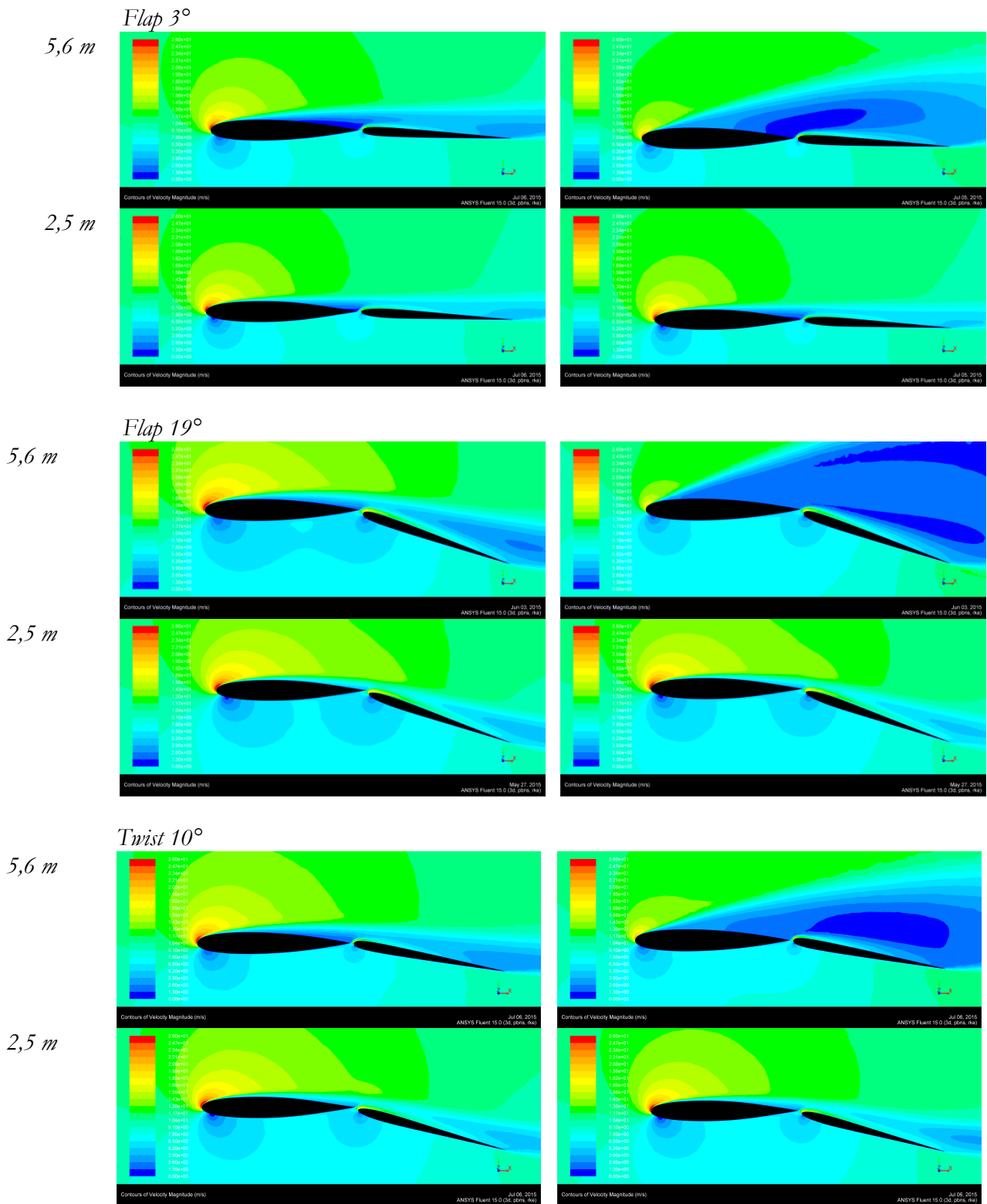


Fig. 5. 27

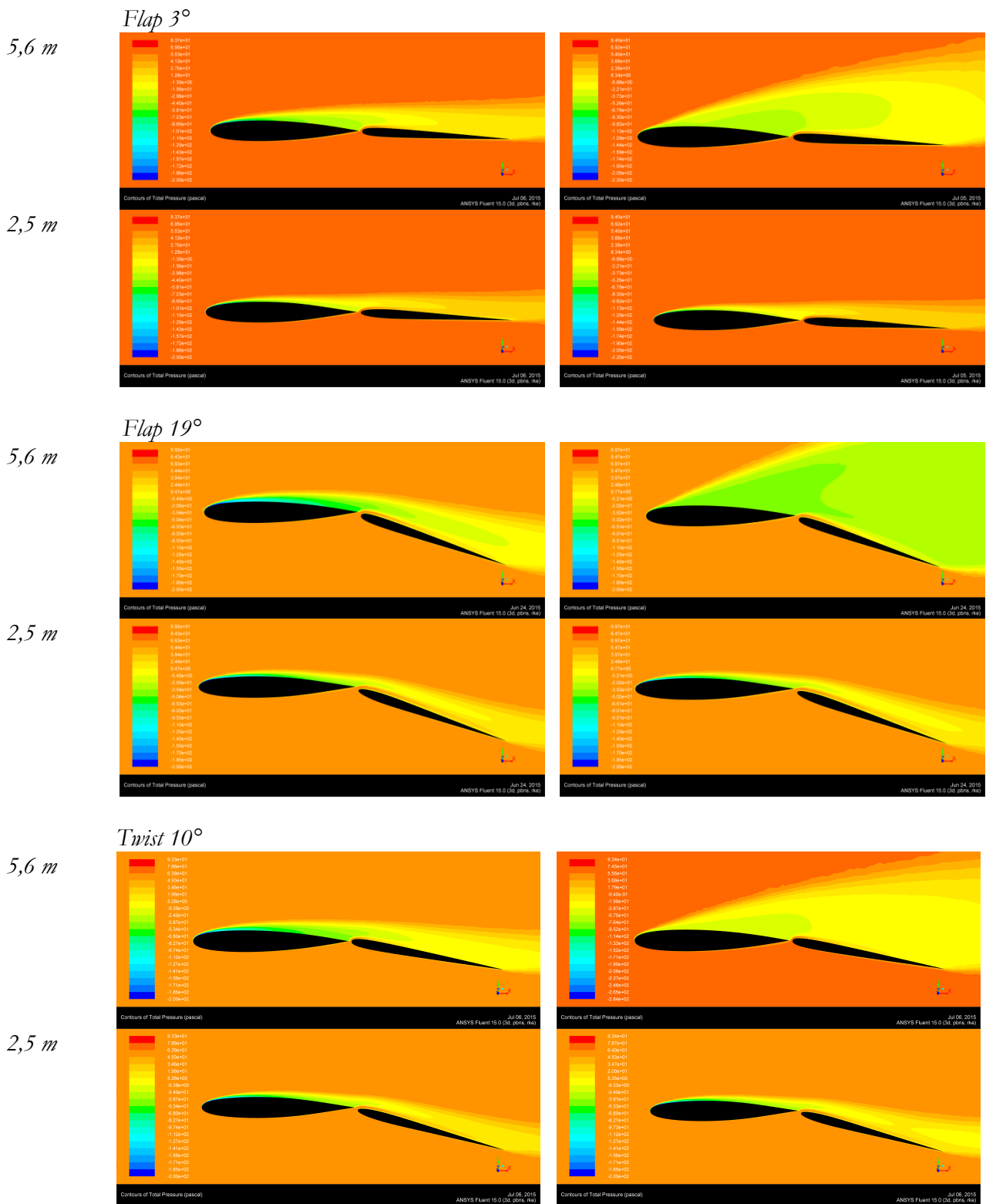
Total Pressure

Fig. 5. 28

Riferendosi soprattutto alle immagini relative agli sforzi tangenziali sul dorso della vela, il comportamento appare di fatto intermedio tra lo stallo osservato nel caso di bassa deflessione (dominante, essendo anche in questo caso la porzione critica per lo stallo quella superiore) e quello di alta deflessione, i cui effetti sono mitigati dal fatto che la zona inferiore riveste un ruolo marginale nel fenomeno.

I principali effetti della diminuzione di deflessione con la quota si notano nella separazione incipiente in corrispondenza dei bordi d'uscita, che sfocia nello stallo in maniera piuttosto graduale in corrispondenza della metà superiore della vela.

5.7 Visualizzazioni del flusso

Riepilogando quanto osservato in questo capitolo, si può affermare che sono stati riscontrati per la vela in esame quattro modalità di stallo differenti:

1. stallo per basse deflessioni del *flap*, caratterizzato da una separazione graduale che comincia principalmente dal bordo d'uscita del *main* a causa del canale di soffiaggio piuttosto chiuso, e in minore misura dal bordo d'uscita del *flap*. E' lo stallo riscontrato per un assetto di 3° di deflessione al variare dell'incidenza ed è localizzato in maggior misura nella parte superiore della vela, per quanto il confine non sia netto.
2. stallo per alte deflessioni del *flap*, caratterizzato dalla comparsa di piccole bolle di separazione in vicinanza del bordo d'attacco del *main* nella parte superiore della vela, che mantengono dimensioni molto ridotte fino allo stallo per poi esplodere in una separazione estesa su tutto il dorso della vela principale, in una zona molto bene delineata. È lo stallo riscontrato per assetti di 19° e 31° di deflessione al variare dell'incidenza e per un assetto di 11° di incidenza al variare della deflessione.
3. stallo con *flap* svergolato: non è propriamente una tipologia di stallo a sé stante dal momento che presenta caratteristiche intermedie a quelle comuni ad assetti aventi deflessioni pari ai valori assunti alla base e all'estremità della vela. Essendo però lo stallo comandato da quello che succede nella metà superiore della vela, la separazione tende ad avvenire con meccanismi dovuti essenzialmente alla deflessione in cima.
4. stallo di *flap*, caratterizzato dal fatto che, mentre nei casi precedenti era sempre il flusso sul *main* a separare, a 35° di deflessione del *flap* si è visto che il flusso non riesce a restare attaccato sul suo dorso nemmeno per bassissimi valori dell'incidenza. È caratterizzato dall'essere l'unico localizzato prevalentemente nella parte inferiore della vela, a causa di una forma del naso del *flap* non costante lungo l'apertura, ma che presenta una forma più "appuntita" nella parte bassa.

Un valido strumento di *post processing* per la valutazione delle zone separate è la visualizzazione delle *pathlines*, ovvero delle traiettorie delle particelle fluide, individuate a partire da posizioni assegnate.

La serie di immagini seguenti rappresenta queste traiettorie tracciate dalle particelle che si staccano da una linea verticale posta a monte della vela, per ogni tipologia di stallo precedentemente descritta.

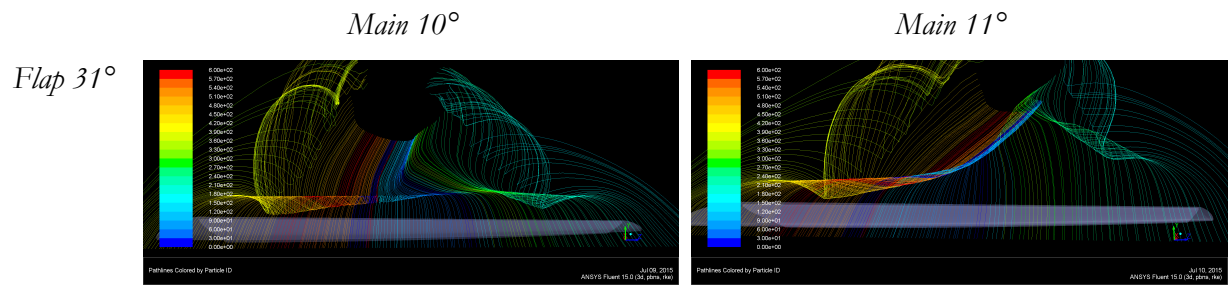
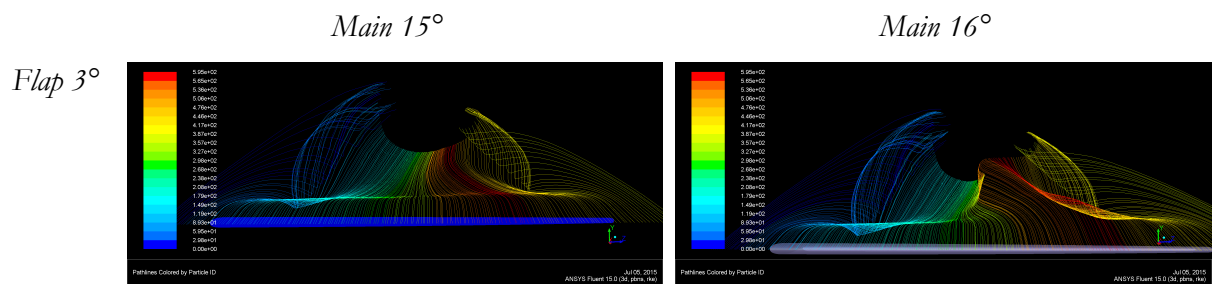
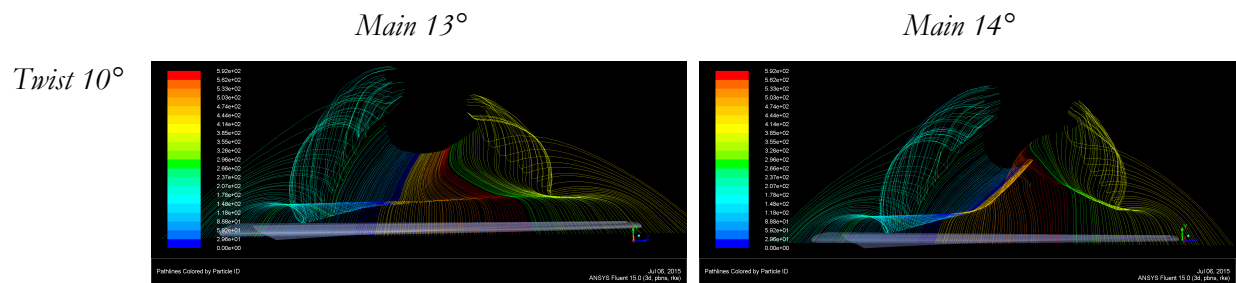
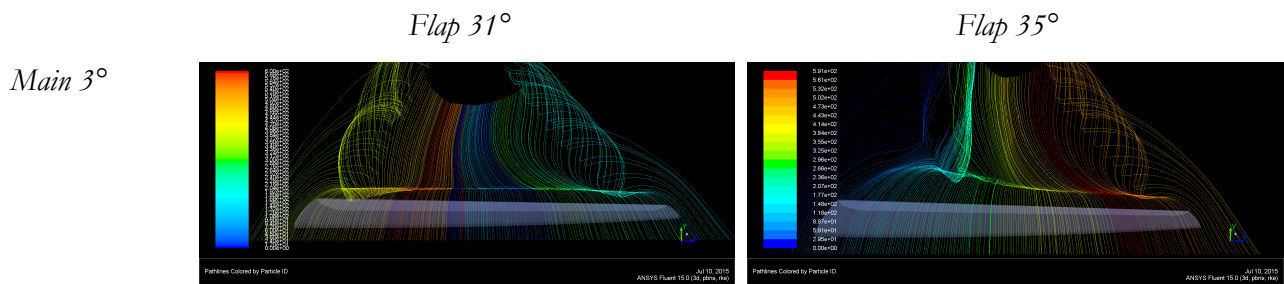
Stallo di Elevata Deflessione*Stallo di Bassa Deflessione**Stallo con Svergolamento**Stallo di Flap*

Fig. 5. 29

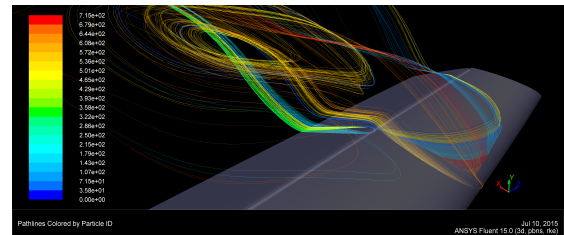
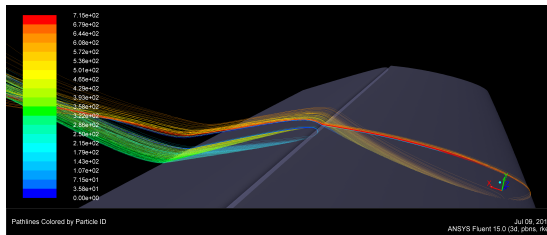
Innanzitutto, è possibile riconoscere chiaramente la presenza dei vortici di estremità in corrispondenza della base e della cima della vela e il *downwash* da questi generato sulle particelle in scia. Nelle configurazioni stallate è possibile anche osservare la nascita di un vortice in corrispondenza della discontinuità tra flusso separato e flusso attaccato, più evidente nel caso di stallo in condizione di elevata deflessione del *flap*. Le condizioni sembrano in ogni caso simili in relazione a queste traiettorie, ad eccezione dell'ultimo caso, nel quale gli effetti dello stallo sono meno evidenti, dal momento che le particelle considerate viaggiano sul dorso del *main* sul quale il flusso risente della turbolenza dovuta alla separazione sul *flap* solo nella parte inferiore della vela

Esiste su *Fluent* la possibilità di visualizzare la traiettoria di particelle che si trovino sulla superficie della vela in corrispondenza di una determinata sezione.

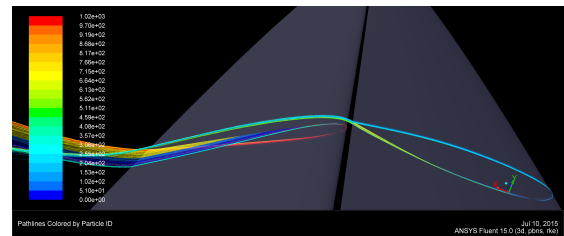
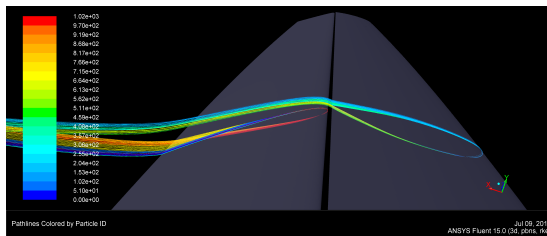
Stallo di Elevata Deflessione

Flap 31°

5,6 m



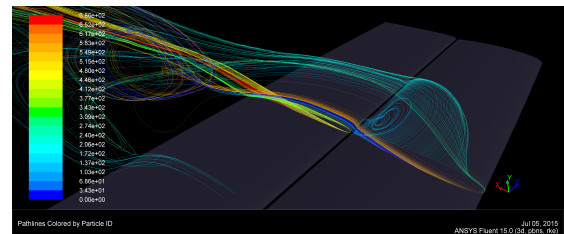
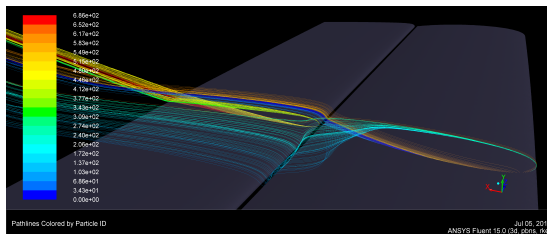
2,5 m



Stallo di Bassa Deflessione

Flap 3°

5,6 m



2,5 m

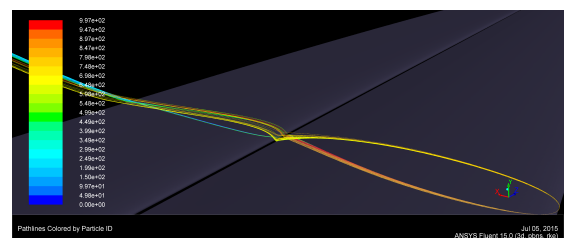
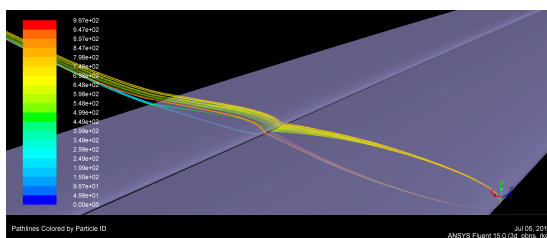
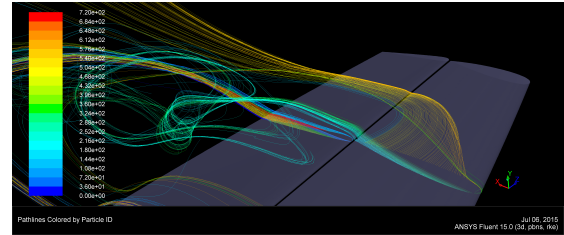
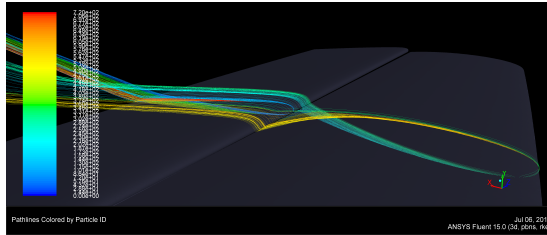


Fig. 5. 30

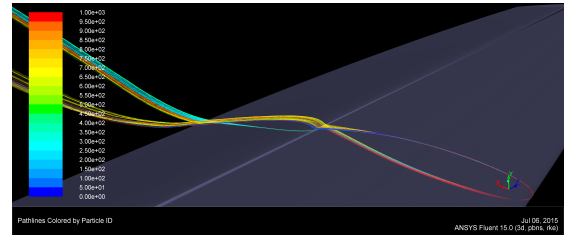
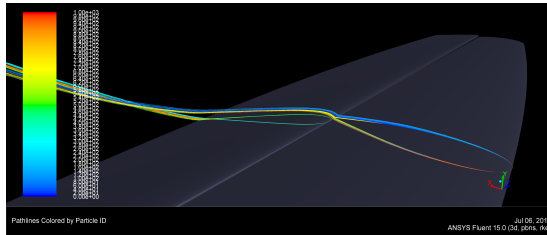
Stallo con Svergolamento

Twist 10°

5,6 m



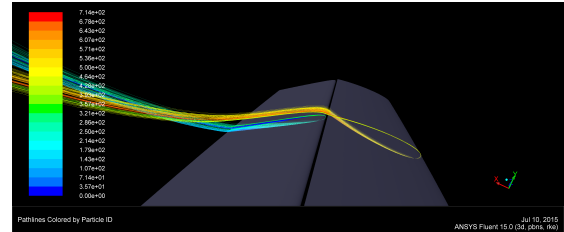
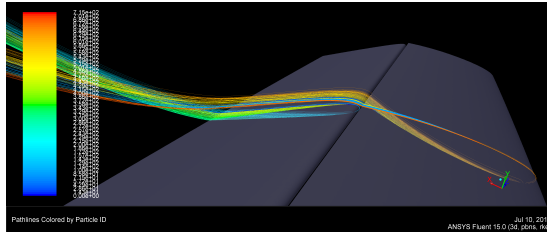
2,5 m



Stallo di Flap

Main 3°

5,6 m



2,5 m

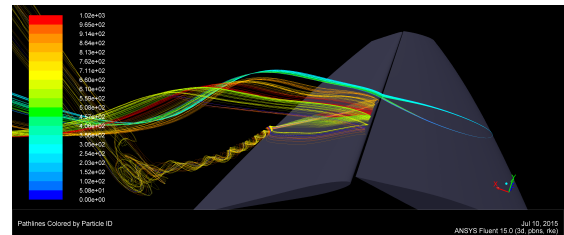
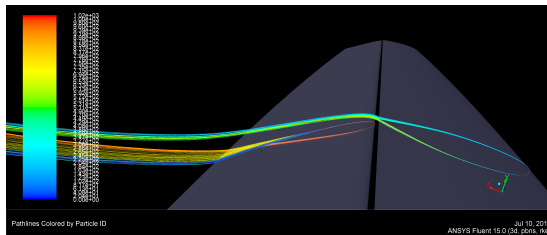


Fig. 5.31

In maniera più dettagliata, si possono osservare le zone nelle quali il flusso separa. Si può notare come nel caso di stallo in condizione di bassa deflessione del *flap* il flusso cominci a separare in una zona in prossimità del bordo d'uscita del *main* già precedentemente allo stallo; lo stesso comportamento appare poi nello stallo della configurazione svergolata, dal momento che, come osservato nel paragrafo precedente, in questo caso lo stallo è effettivamente analogo a quello che si ha per bassa deflessione.

Per quanto riguarda lo stallo di *flapI*, esso è effettivamente l'unico caso in cui il flusso separa nella parte inferiore della vela in cui il flusso sul *main* allo stallo è ancora attaccato.

Per una comprensione ancora più immediata del fenomeno può essere utile raccogliere le traiettorie prese a partire da diverse sezioni in un'unica immagine; valgono ovviamente le stesse considerazioni fatte sino a questo momento.

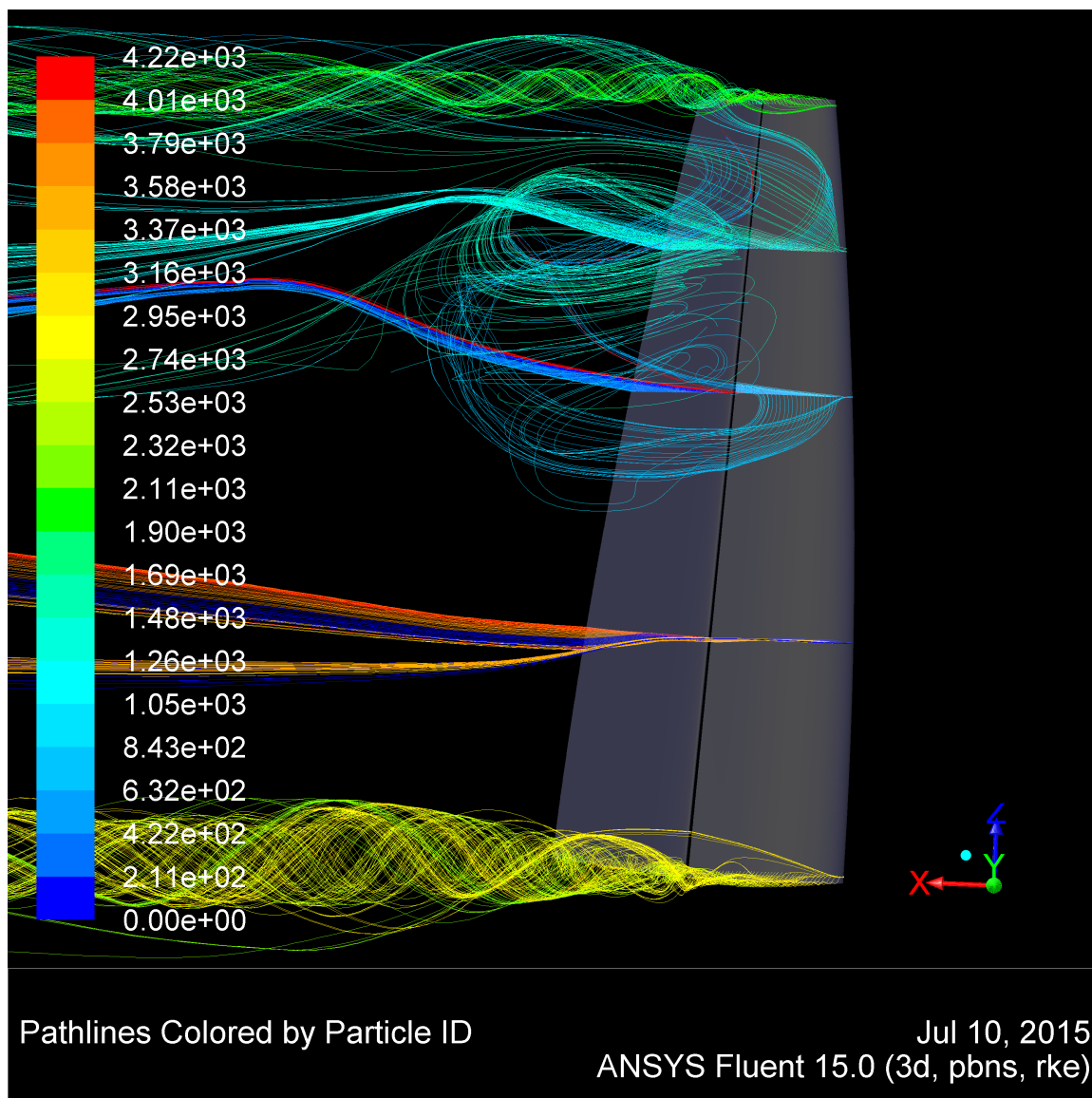
*Stallo di Elevata Deflessione**Flap 31°*

Fig. 5. 32

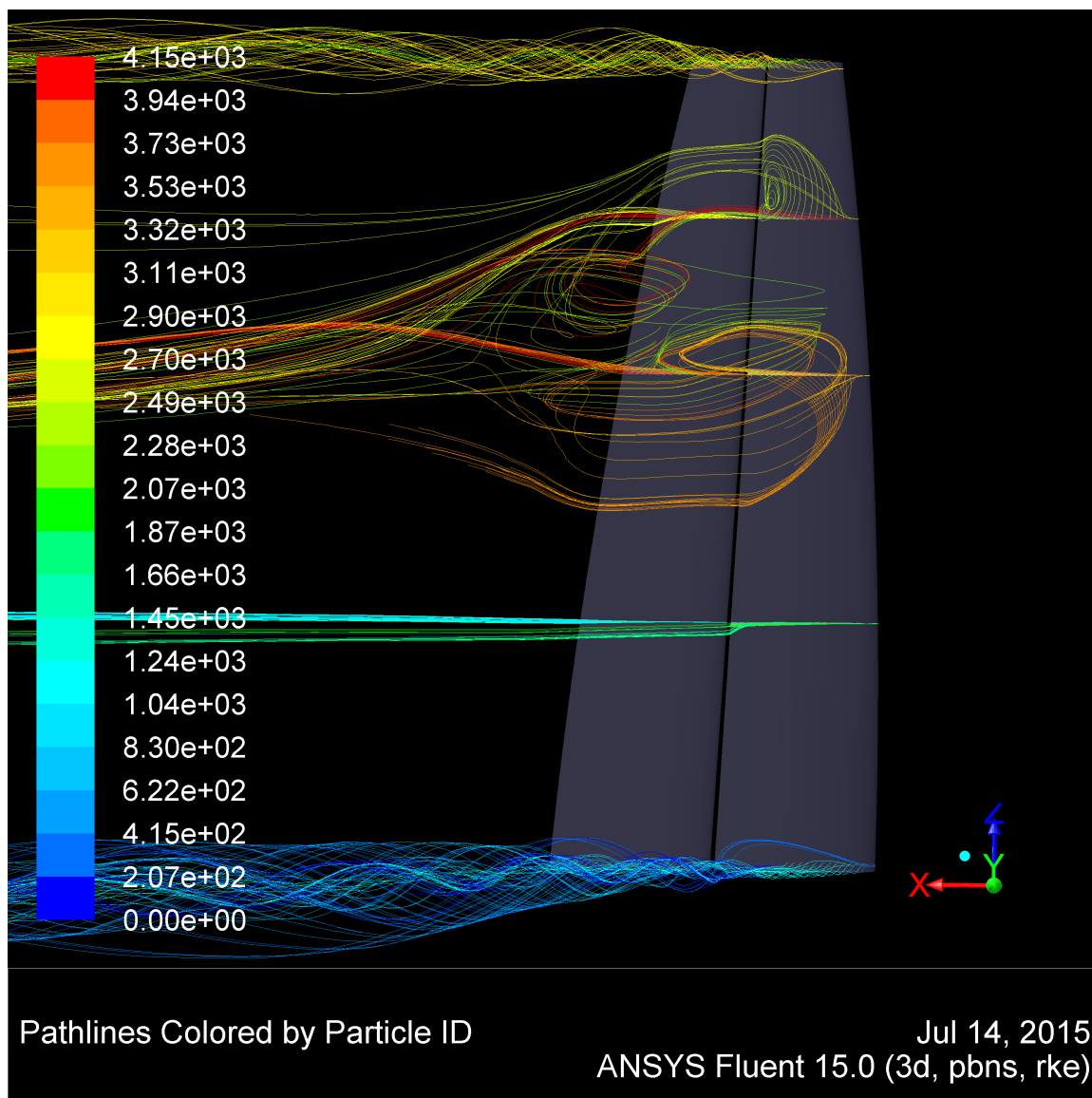
*Stallo di Bassa Deflessione**Flap 3°*

Fig. 5. 33

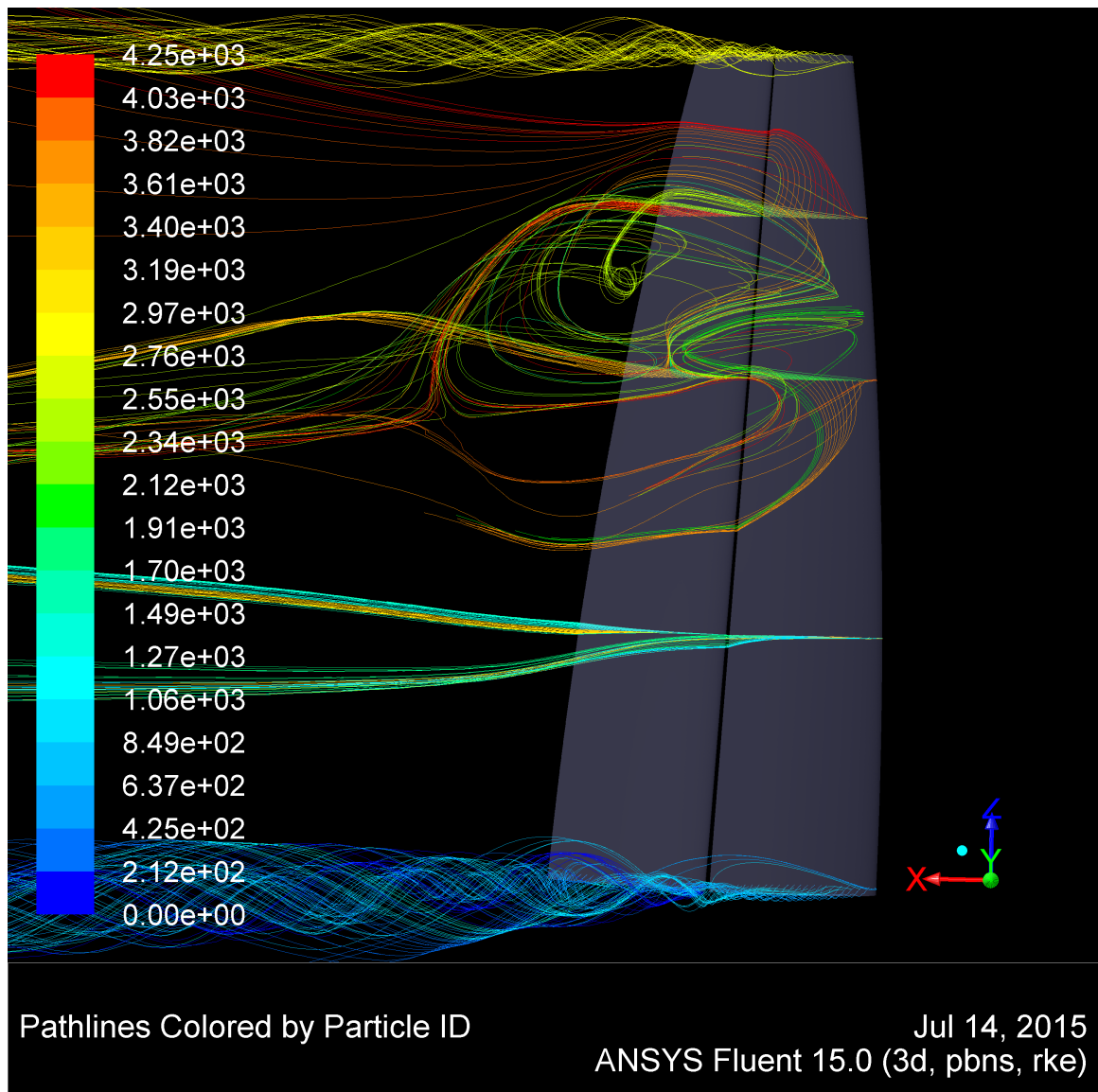
*Stallo con Svergolamento**Twist 10°*

Fig. 5. 34

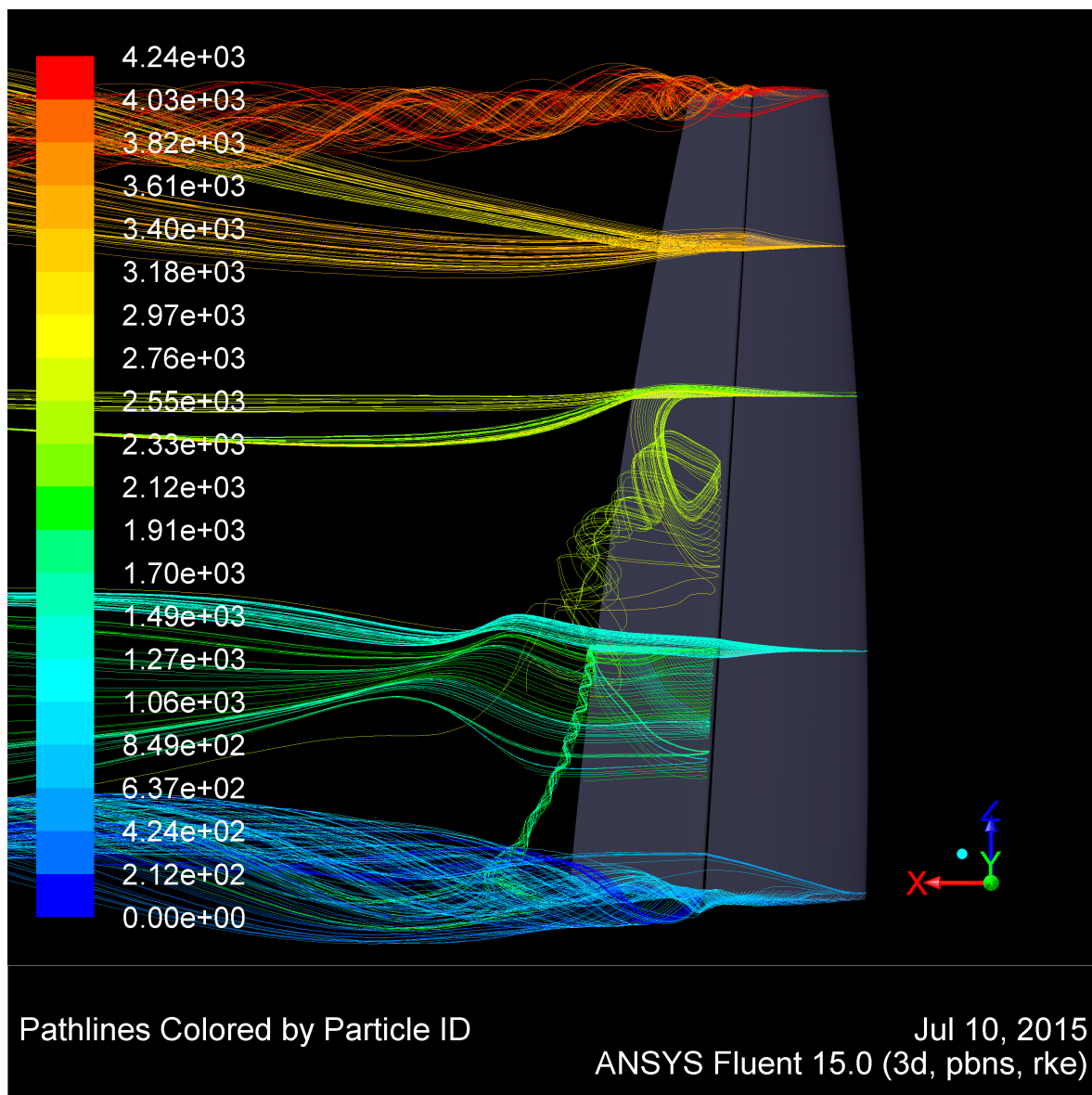
*Stallo di Flap**Main 3°*

Fig. 5. 35

Capitolo VI

Analisi della sensorizzazione

In questo capitolo sarà svolto lo studio centrale di questo lavoro di tesi, atto alla definizione di un criterio da seguire per sensorizzare una vela rigida allo scopo di automatizzare la navigazione in assetto di ottimo.

Preliminarmente sono state individuate quattro zone nelle quali, tramite la conoscenza dell'andamento della pressione sul corpo, fosse possibile caratterizzare il flusso e ricondurlo a una specifica condizione di assetto:

1. Bordo d'attacco della vela principale;
2. Bordo d'attacco della vela secondaria;
3. Bordo d'uscita della vela principale;
4. Bordo d'uscita della vela secondaria.

Pertanto, di seguito saranno discusse le possibilità e le problematiche connesse all'ottenimento dei dati necessari alla definizione della condizione di lavoro, zona per zona, nell'ordine sopra descritto.

Infine, sarà operata un'attività di sintesi dell'analisi svolta al fine di definire un criterio che possa rivelarsi adeguato per il caso in esame.

6.1 Sensorizzazione del bordo d'attacco del main

Scopo

La presenza di sensori di pressione disposti in vicinanza del bordo d'attacco della vela principale può essere utile, principalmente, per la determinazione della pressione totale - che consente di determinare la velocità del vento apparente - e della posizione del punto di ristagno - che può essere messa in relazione con la direzione del vento apparente. Un'altra proprietà che può essere ricavata grazie disponendo gli strumenti in questa zona della vela è il valore del modulo del picco di aspirazione, che potrebbe rappresentare una valida indicazione per la determinazione dello stallo della vela.

Si osservi che, mentre i sensori di pressione sono pensati per misurare la variazione di pressione statica rispetto a quella del flusso indisturbato, per rendere l'analisi dei dati più agevole, si è preferito eseguire lo studio seguente come se il dato fornito fosse direttamente il coefficiente di pressione; in ogni caso, questo è ottenuto facilmente scalando il precedente con la pressione dinamica, ed è quindi direttamente correlato alla condizione di effettivo funzionamento dei sensori.

In questo paragrafo sarà definito un modello per il calcolo delle tre proprietà appena descritte, quindi sarà compiuta un'analisi della sensibilità del risultato alla spaziatura tra i punti di misura e alla quota (altezza) di posizionamento dei sensori. Infine, sarà discussa la risoluzione richiesta agli strumenti per poter essere correttamente utilizzati.

Approssimazione quadratica

Innanzitutto, si è determinato un metodo di estrapolazione dei valori di interesse a partire dai dati misurati dai sensori. Considerando che nel punto di ristagno la pressione assume il massimo valore, pertanto si è deciso di articolare la procedura nei seguenti passaggi:

1. Ricerca del valore di pressione massimo misurato e del relativo sensore;
2. Estrapolazione del dato relativo ai due sensori adiacenti;
3. Interpolazione quadratica per i tre punti appena determinati;
4. Determinazione del punto di massimo e del valore di picco della parabola interpolante.

Gran parte della validità del metodo risiede nel fatto che l'interpolazione quadratica possa essere considerata un'approssimazione appropriata dell'andamento della pressione in prossimità del punto di ristagno.

Come verifica preliminare di questo requisito, si è deciso di analizzare un profilo curvo assimilabile a quello complessivo della vela in esame tramite il software di calcolo bidimensionale di flusso potenziale e strato limite accoppiato Xfoil; in tal modo è stato possibile avere una prima verifica della validità dell'approccio in tempi molto ridotti, prima di rivolgersi alle simulazioni CFD sulla vela rigida.

Si è fatto riferimento al profilo NACA 8510, che ha il punto di massima curvatura al 50% della corda, impostando una pannellizzazione raffinata verso il bordo d'attacco, in modo da fornire una risoluzione soddisfacente nella zona di interesse.

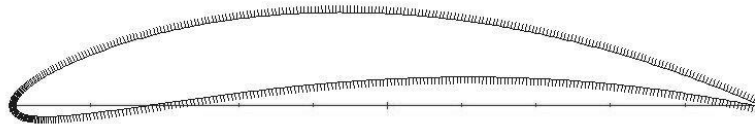


Fig. 6. 1

Quindi, si è svolta una prova iniziale risolvendo le equazioni semplificate per flusso non viscoso impostando il coefficiente di portanza al valore di 1,5. Di seguito viene mostrato l'andamento del coefficiente di pressione ottenuto, poi estratto come file di testo con le coordinate del profilo e il relativo coefficiente di pressione.

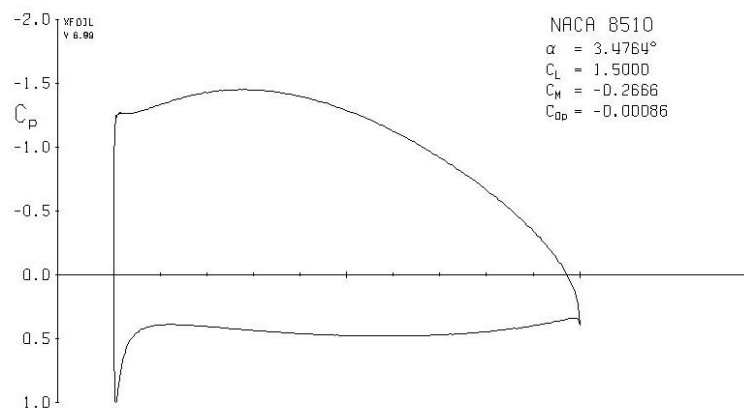


Fig. 6. 2

Una volta determinata la posizione del punto di ristagno per mezzo dell'interpolazione quadratica, si è potuta svolgere un'analisi del suo andamento al variare della spaziatura tra i punti presi sulla distribuzione del c_p .

L'immagine seguente mostra l'applicazione del metodo appena descritto per la determinazione del punto di ristagno tramite interpolazione parabolica. In verde sono rappresentati i punti forniti dal software, dove sull'asse x è stata riportata l'ascissa curvilinea del profilo adimensionalizzata con la corda e calcolata per interpolazione lineare dalle coordinate del profilo. In blu è rappresentata la distribuzione degli stessi sotto forma di linea continua mentre in rosso la parabola passante per i tre punti fondamentali individuati tra quelli disponibili: quello di massimo, e i due adiacenti.

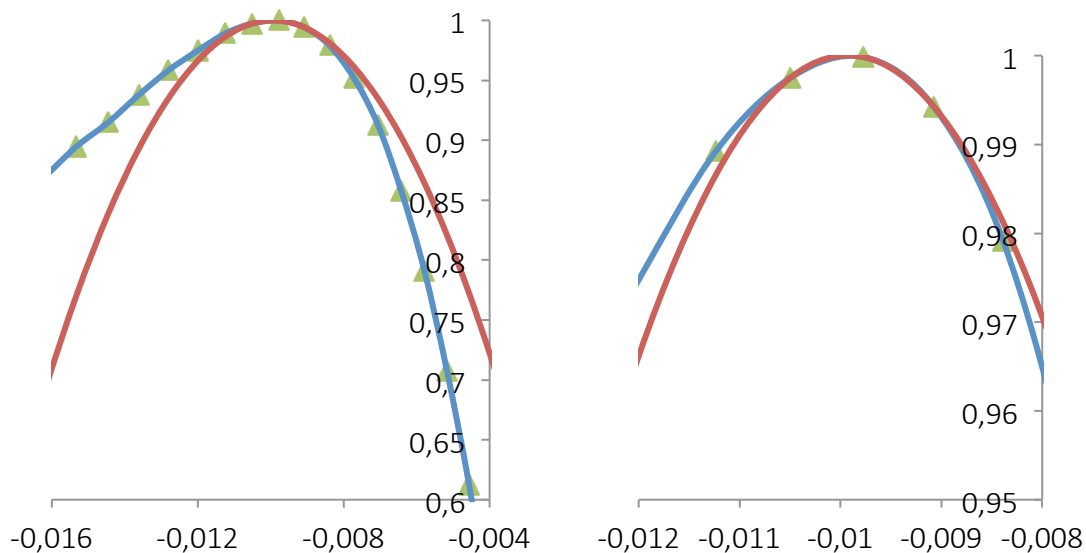


Fig. 6. 3

Servendosi di tutti i punti forniti da XFoil, la spaziatura tra i tre punti in corrispondenza del massimo misurato vale indicativamente 1,6 mm: le immagini mostrano anche qualitativamente come l'approssimazione quadratica sia soddisfacente a rappresentare l'andamento *effettivo* di riferimento se si utilizza un passo di tale entità tra i punti di misura.

Si è misurato, quindi, lo spostamento del punto di ristagno determinato tracciando la parabola passante per tre punti della distribuzione posti a distanza di volta in volta maggiore, e considerando il caso conservativo in cui il punto misurante il massimo valore del coefficiente di pressione non capiti tra quelli rilevati dai sensori.

Di seguito, si riporta un esempio della procedura utilizzata e la tabella di riepilogo delle variazioni di misura ottenute in ciascun caso.

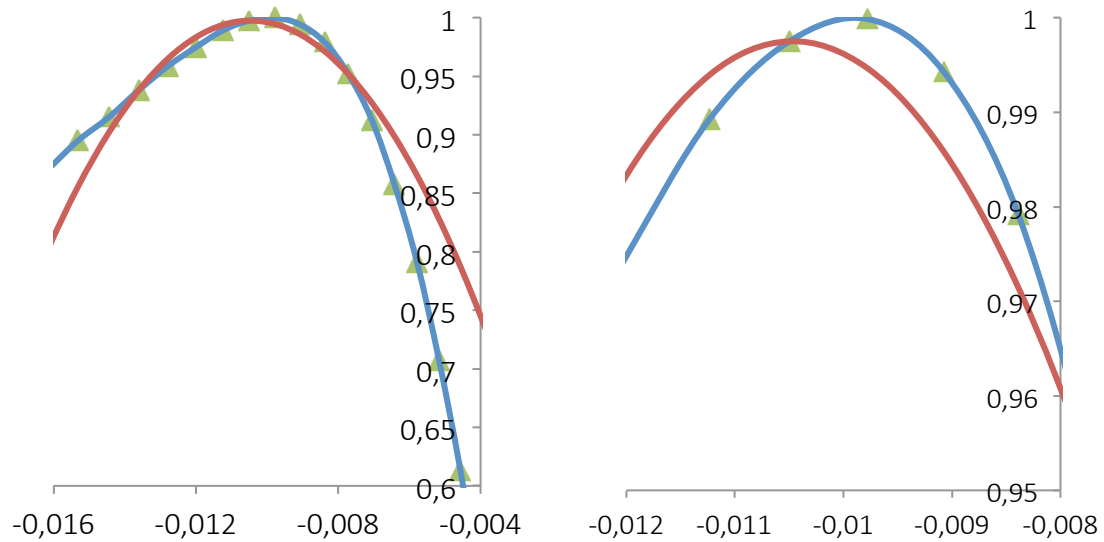


Fig. 6. 4

Distanza punti di misura [mm]	Errore sul Punto di Ristagno [mm]	Errore sul Coefficiente di Pressione [%]
3,3	0,2	0,04
4,9	0,6	0,13
6,4	0,7	0,79
6,6	1,1	0,32
6,8	1,2	0,25
7,0	0,7	0,62

Tab. 6. 1

L'errore sulla valutazione del punto di ristagno è stato espresso in mm prendendo come corda di riferimento quella del profilo alla base della vela, pari a 2,5 m.

In seguito, lo stesso tipo di analisi è stato eseguito utilizzando il solutore anche per flusso viscoso per diversi valori dell'incidenza del profilo, con numero di Reynolds pari a 1,5 milioni, ottenendo i seguenti risultati:

Incidenza [°]	Distanza punti di misura [mm]	Errore sul Punto di Ristagno [mm]	Errore sul Coefficiente di Pressione [%]
-3	5,0	0,5	0,20
0	5,2	0,5	0,37
3	6,8	1,2	0,79
6	6,0	0,2	0,01
12	7,5	0,7	0,04
15	10,3	0,5	0,03

Tab. 6. 2

I risultati mostrano come gli errori commessi siano irrilevanti per il calcolo del coefficiente di pressione e, in ogni caso, contenuti per la determinazione della posizione del punto di ristagno; in particolare, di valore massimo non superiore a 1 mm quando il passo dei sensori è di mezzo centimetro.

Questa considerazione giustifica una più ampia campagna di indagine computazionale sul modello di vela tridimensionale e l'applicazione di tale approccio al caso analizzato.

Misura del punto di ristagno

La sezione di riferimento per lo studio della sensorizzazione della vela è stata presa a un'altezza di 2,5 metri rispetto all'origine del sistema di riferimento. Lo strumento di misura è costituito da una striscia che individua un vettore di N sensori (dispari), disposti con passo p in modo simmetrico rispetto al bordo d'attacco. Il sensore centrale, pertanto, è applicato in corrispondenza del punto di massima curvatura.

Avendo a disposizione esclusivamente i dati forniti dalla CFD, innanzitutto è stato necessario definire dei valori di riferimento per la posizione del punto di ristagno, rispetto ai quali calcolare l'errore dovuto a una diversa spaziatura dei sensori. Avvalendosi dell'analisi condotta preliminarmente tramite Xfoil, si è deciso di prendere come valori di riferimento quelli determinati con un passo tra i sensori di 1 mm.

Per automatizzare la procedura, tramite MATLAB è stato scritto un programma che esegue, per ogni valore dell'incidenza, le seguenti operazioni:

1. Leggere i file di testo contenenti i valori del coefficiente di pressione per ogni ascissa e importare i valori sotto forma di matrice a due colonne;
2. Definire un vettore contenente le posizioni dei sensori, inseriti come input p e N ;
3. Definire, attraverso un'interpolazione *spline*, il valore del c_p letto da ogni sensore;
4. Determinare il massimo valore tra i forniti e il sensore di riferimento di tale misura;
5. Individuare i due sensori adiacenti, e le rispettive misure;
6. Definire l'equazione della parabola passante per i tre punti così definiti;
7. Determinare il punto di massimo e il valore di massimo della curva appena definita

Si riporta, quindi, il grafico che rappresenta lo spostamento della posizione del punto di ristagno al variare dell'incidenza, determinato con un passo tra i sensori di 1 mm.

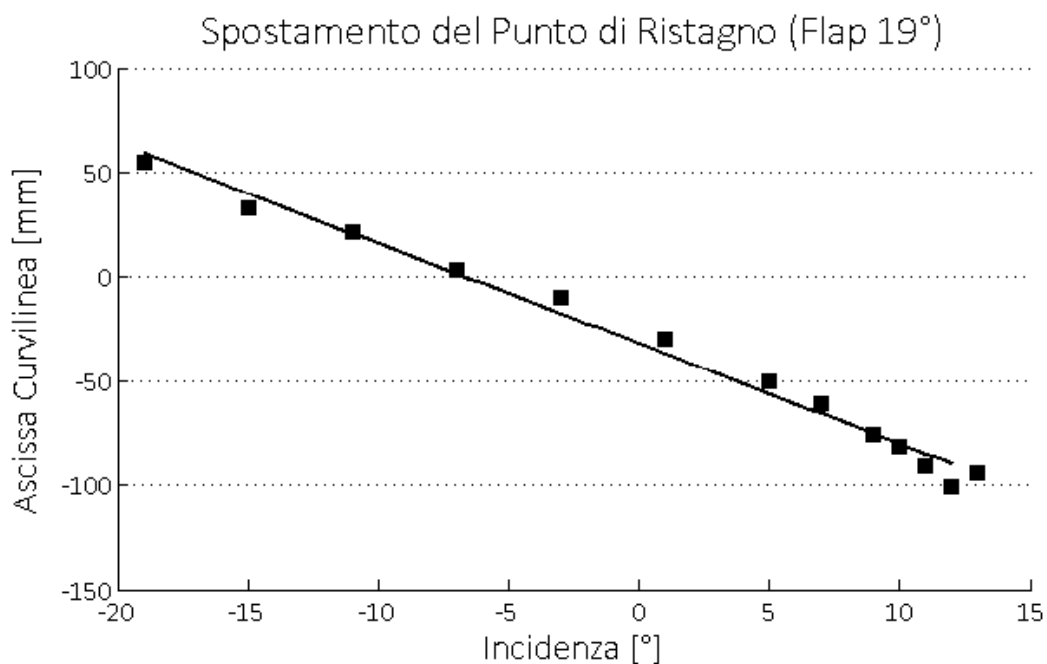


Fig. 6. 5

Il valore massimo del modulo dell'ascissa curvilinea che individua l'allontanamento del punto di ristagno dal punto di massima curvatura è pari a circa 10 cm. Oltre i 12° di incidenza, invece, il punto di ristagno tende a tornare nuovamente verso il bordo di attacco.

Sovrapposta ai valori calcolati alle incidenze definite dalle simulazioni CFD è stata tracciata la retta interpolante i dati (depurati del valore ottenuto oltre lo stallo). Si può osservare una pendenza della curva pari a $-4,79$, che porta alla seguente conclusione: se si considera una configurazione con deflessione del flap pari a 19° , per ogni grado di variazione dell'incidenza il punto di ristagno si sposta di circa mezzo centimetro lungo il profilo considerato.

Si è voluto, quindi, analizzare l'errore commesso rispetto alle condizioni di riferimento appena calcolate quando si aumenta il passo tra i sensori, facendo variare tale valore in un intervallo compreso tra i 2 e i 15 mm.

In ognuno di questi casi è stata ripetuta l'analisi dell'errore assoluto(in mm) riscontrato nella determinazione della posizione del punto di ristagno alle diverse incidenze, e si sono anche determinati i valori medi e massimi riscontrati per ciascun valore della spaziatura.

I principali risultati ottenuti sono riepilogati nel grafico seguente e nella successiva tabella:

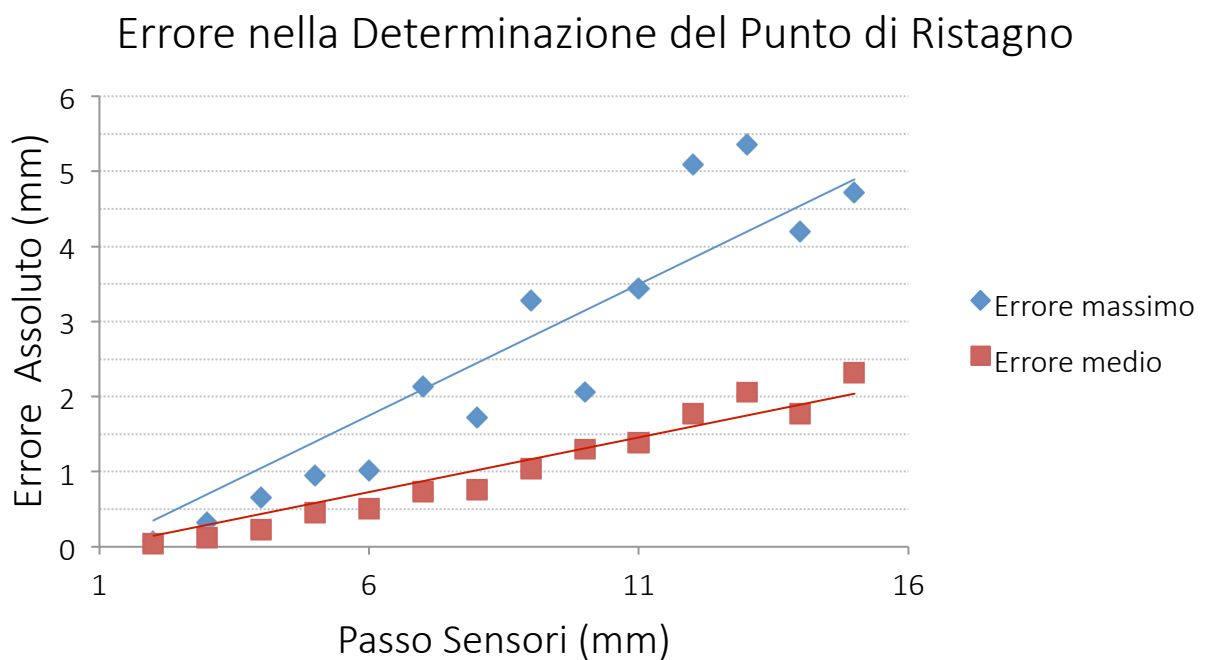


Fig. 6. 6

Passo [mm]	Errore Medio P.to Rist [mm]	Errore Max P.to di Rist [mm]	Incert. Media Incidenza [°]	Incert. Max Incidenza [°]	n. sensori
2	0,04	0,07	0,01	0,02	103
5	0,46	0,95	0,10	0,20	43
10	1,31	2,06	0,27	0,43	23
15	2,32	4,72	0,48	0,99	17

Tab. 6. 3

Una particolarità interessante su cui vale la pena di porre l'attenzione è che l'errore commesso a causa della spaziatura porta sempre a una misura del punto di ristagno spostata verso il bordo d'uscita, in ragion del fatto che il gradiente di pressione è più elevato verso il bordo d'attacco.

Si ritiene importante precisare che il numero di sensori indicato si riferisce unicamente al caso in esame, nel quale la deflessione del flap è mantenuta costante al valore di 19° . È possibile, tuttavia, e ragionevolmente probabile, che diversi assetti della vela forniscano collocazioni del punto di ristagno più arretrate in condizioni di interesse per la navigazione e, in tal caso, sarà necessario strumentare una porzione più ampia di quella indicata. Questa eventualità sarà discussa in seguito nel paragrafo ma interessava, in questo passaggio, dare un'indicazione qualitativa dell'ordine di grandezza del numero di sensori necessario.

La stessa analisi può essere eseguita a incidenza fissata con il variare della deflessione del flap, per confrontare gli andamenti e individuare eventuali differenze. Si mostrano, a titolo di esempio, i risultati ottenuti per una configurazione a 11° incidenza.

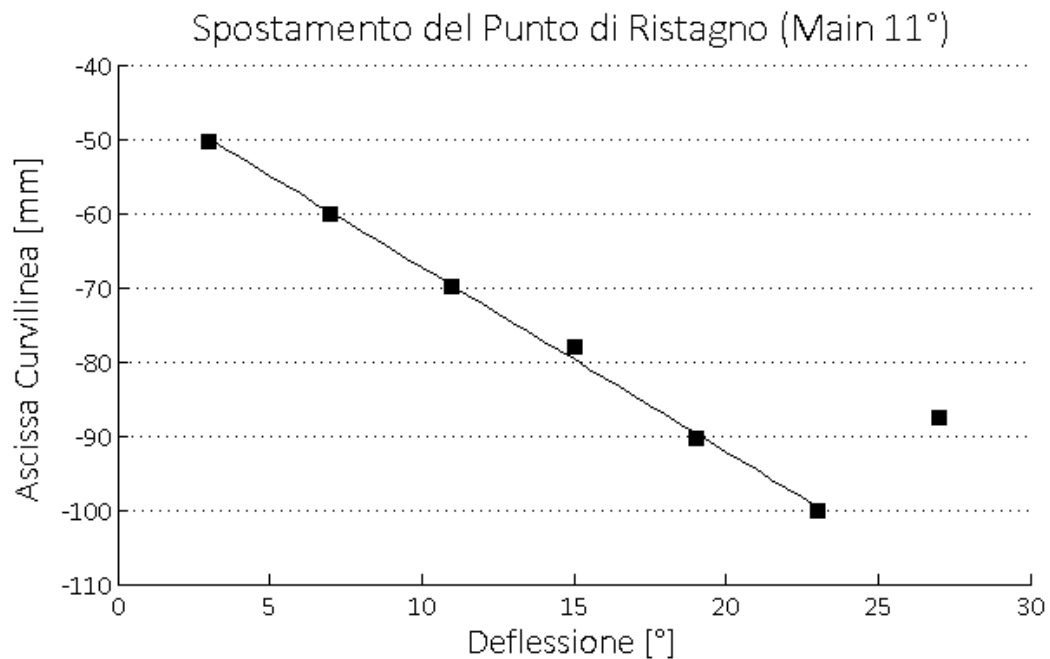


Fig. 6. 7

La pendenza della retta interpolante, in questo caso, è pari a -2,48 e, pertanto, un analogo errore (per l'imprecisione dell'interpolazione parabolica) porta inevitabilmente a incertezze maggiori nell'associare la posizione del punto di ristagno a una deflessione del flap.

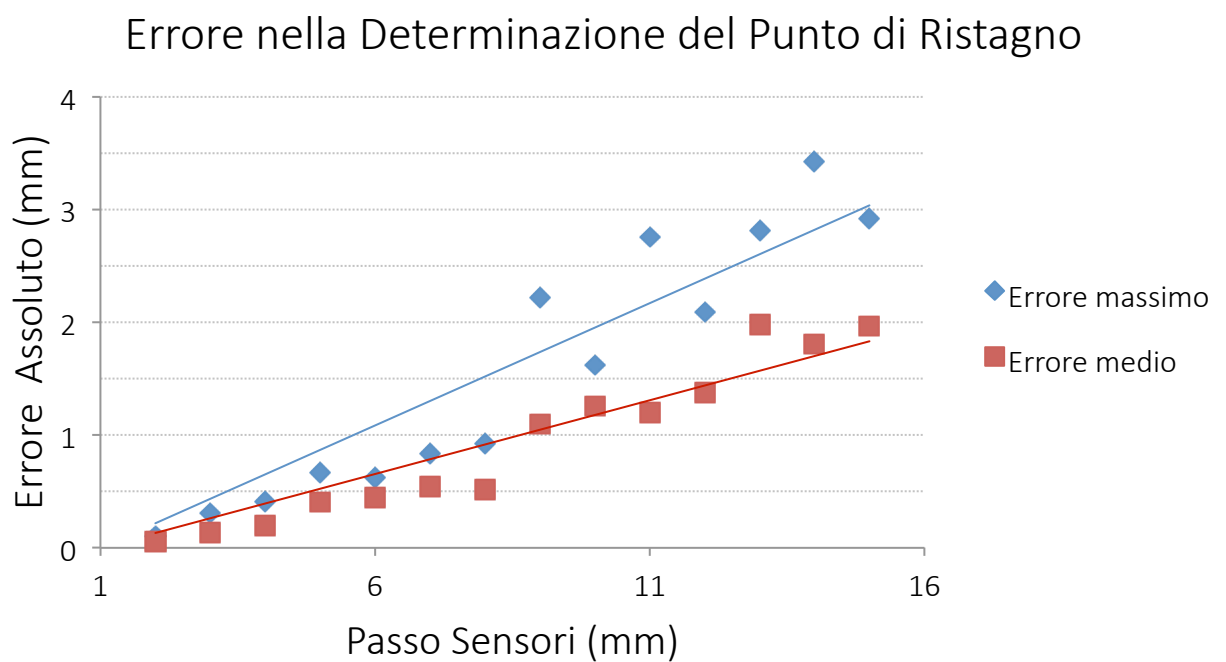


Fig. 6. 8

Passo [mm]	Errore Medio P.to Rist [mm]	Errore Max P.to Rist [mm]	Incert. Media Deflessione [°]	Incert. Max Deflessione[°]	n. sensori
2	0,06	0,11	0,02	0,04	103
5	0,41	0,67	0,16	0,27	43
10	1,26	1,62	0,51	0,65	23
15	1,97	2,92	0,79	1,18	17

Tab. 6. 4

Gli errori assoluti nella determinazione della posizione del punto di ristagno sono effettivamente analoghi a quelli ricavati in precedenza, ma conducono, come già anticipato, a incertezze maggiori sulla deflessione.

Misura della pressione totale

La stessa procedura descritta per il calcolo della posizione del punto di ristagno può essere svolta per stimare il valore della pressione totale sul corpo, che consente di ricavare il modulo della velocità del vento apparente che investe la vela, tramite la relazione:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_T - p_\infty)}{\rho}}$$

Ragionando analogamente a quanto fatto in precedenza in termini di coefficiente di pressione, è possibile valutare l'errore percentuale commesso rispetto al valore teorico, in questo caso noto e pari al valore unitario.

In realtà, il confronto è stabilito comunque con i risultati ottenuti impostando il passo dei sensori a 1 mm, per ricavare una misura dell'errore dovuto unicamente alla spaziatura. In caso contrario, l'errore sarebbe influenzato in massima parte dalla griglia della *mesh* del calcolo

CFD, che restituisce per il coefficiente di pressione massimo valori vicini ma non esattamente corrispondenti al valore unitario.

Da questo può essere poi facilmente ricavato l'errore percentuale commesso nella valutazione del modulo della velocità grazie alla seguente relazione:

$$\frac{\Delta_V}{V} = \sqrt{1 + \frac{\Delta_{c_p}}{c_p}} - 1 \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta_{c_p}}{c_p}$$

dove l'approssimazione è tanto più accurata quanto minore è l'errore percentuale sul coefficiente di pressione. Quando questo è inferiore all' 8%, la differenza tra la relazione esatta e quella approssimata si mantiene inferiore al centesimo. L'errore percentuale massimo riscontrato nel presente lavoro è del 5%, pertanto si può ammettere l'utilizzo della relazione semplificata.

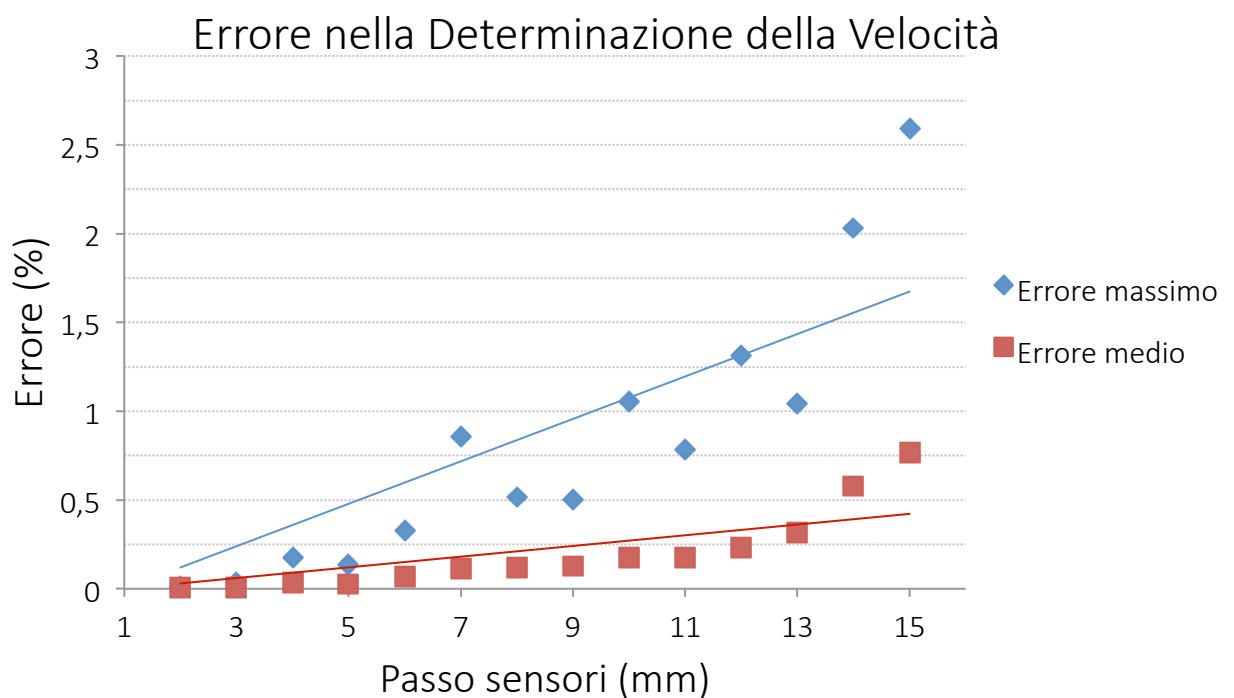


Fig. 6. 9

Passo [mm]	Errore Medio Velocità [%]	Errore Massimo Velocità [%]	Numero Sensori
2	0,004	0,01	103
5	0,02	0,14	43
10	0,18	1,05	23
15	0,77	2,59	17

Tab. 6. 5

Misura del picco di aspirazione

Di seguito si riporta, infine, l'andamento del modulo del picco di aspirazione sul *main* a un'altezza di 2,5 metri dall'origine del sistema di riferimento, con i punti di misura posizionati con passo di 1 mm.

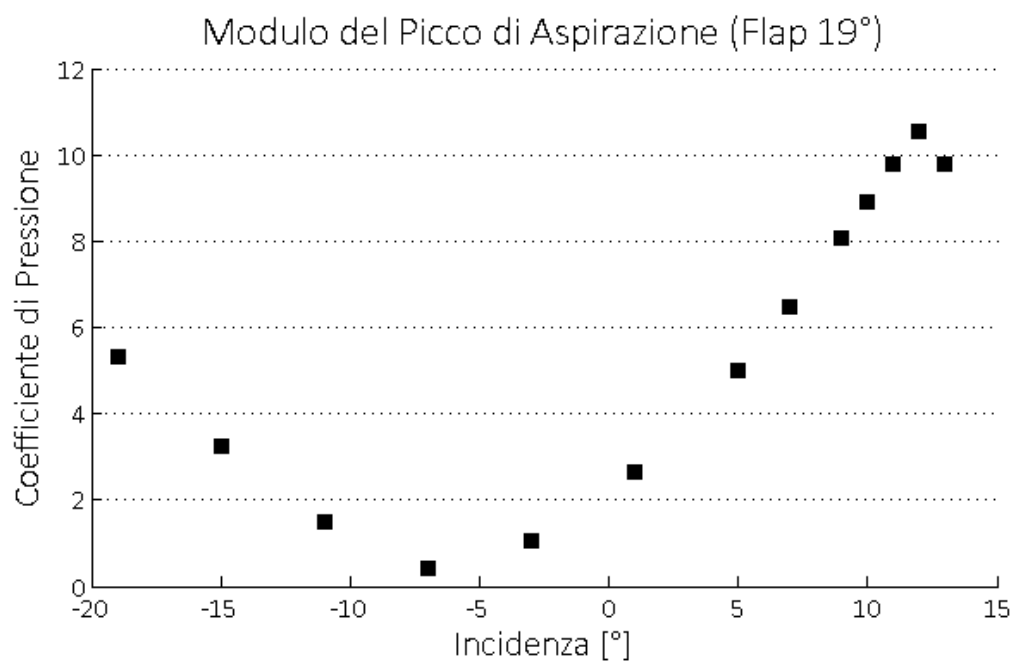


Fig. 6. 10

Dal grafico si nota come nella sezione considerata il calo del picco di aspirazione non risulti particolarmente marcato, perfettamente in accordo con quanto visto riguardo alla tipologia di stallo di estremità alla quale è soggetta la vela nella configurazione in esame. Si vedrà in seguito come varia il comportamento prendendo in considerazione una sezione posta in posizione più elevata.

Per quanto riguarda l'errore nella misura dovuto alla spaziatura è stata riscontrata una variazione inferiore all'1,5% nella valutazione del picco di aspirazione con un passo dei sensori di 10 mm, valore che non pregiudica perciò l'andamento qualitativo osservato nel grafico. L'analisi a incidenza fissata è analoga, e la si presenta nel seguente grafico:

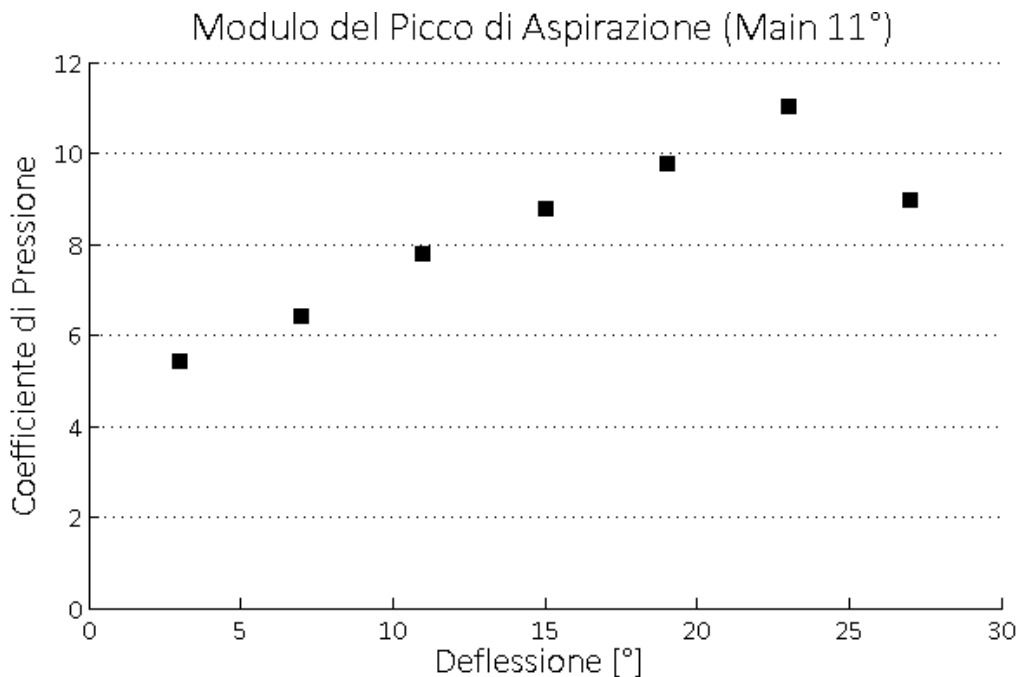


Fig. 6. 11

È evidente, in ogni caso, che questo tipo di informazione sembra potersi rivelare utile solo quando è possibile controllare in tempo reale i valori assunti durante la regolazione dell'assetto. Infatti, l'andamento è indicazione dello stallo solo nel momento in cui è possibile registrare un cambiamento nel valore del picco di aspirazione, e non quando questo raggiunge un preciso valore. Tale considerazione sarà ripresa nel seguito.

Effetto della quota di misura

Le medesime analisi finora descritte sono state quindi eseguite per una sezione posta a 5 metri di altezza dalla base della vela, e quindi 3,1 metri più in alto della precedente. Si riportano di seguito i risultati ottenuti:

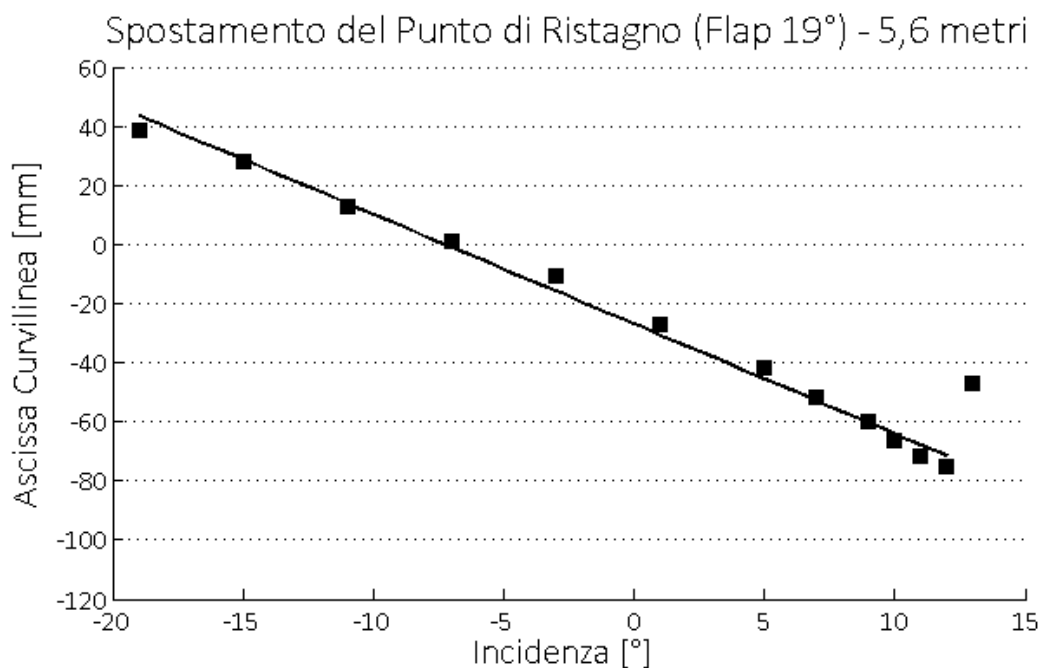


Fig. 6. 12

In questo caso, la pendenza della retta interpolante i valori ottenuti fino allo stallo ha una pendenza inferiore alla precedente, e pari a -3,71. Il valore massimo raggiunto lungo l'ascissa curvilinea dal punto di ristagno è pari a circa 7,5 centimetri. Questo è un risultato che certamente non sorprende, giacché in questa sezione la corda del profilo della vela principale è minore rispetto al caso analizzato in precedenza.

Errore Determinazione P.to di Ristagno - 5,6 metri

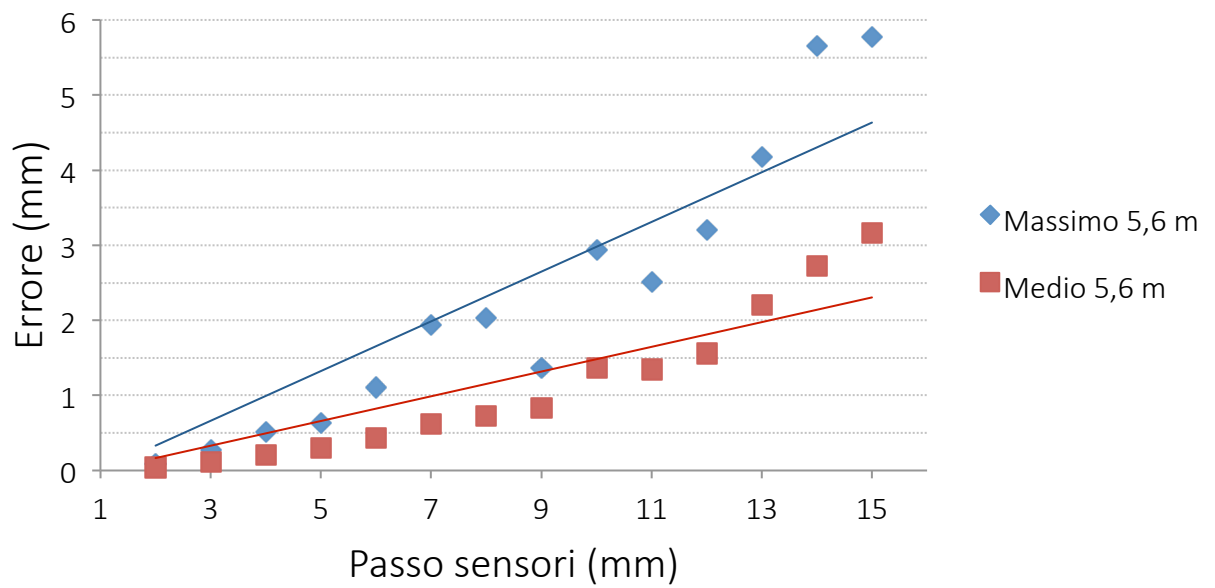


Fig. 6. 13

Passo [mm]	Errore Medio P.to Rist [mm]	Errore Max P.to Rist [mm]	Incert. Media Incidenza [°]	Incert. Max Incidenza [°]	n. sensori
2	0,04	0,09	0,01	0,03	77
5	0,31	0,64	0,08	0,17	33
10	1,36	2,94	0,37	0,79	17
15	3,16	5,77	0,85	1,56	13

Tab. 6. 6

Errore Determinazione P.to di Ristagno - confronto

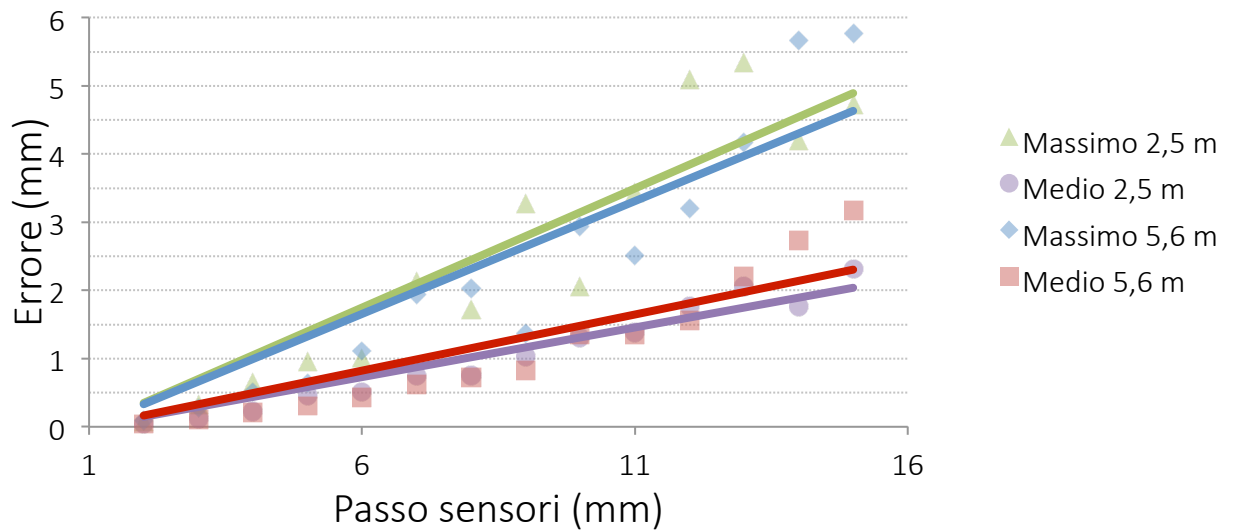


Fig. 6. 14

Gli errori assoluti nella determinazione del punto di ristagno sono simili a quelli riscontrati nella sezione bassa della vela e portano, quindi, a errori percentuali maggiori nella determinazione dell'incidenza di lavoro a causa della dimensione inferiore delle sezioni più alte. A riprova di ciò, si riporta il confronto tra le due sezioni per quanto concerne gli errori commessi nella valutazione della velocità del vento apparente che investe la vela.

Errore Determinazione Velocità - 5,6 metri

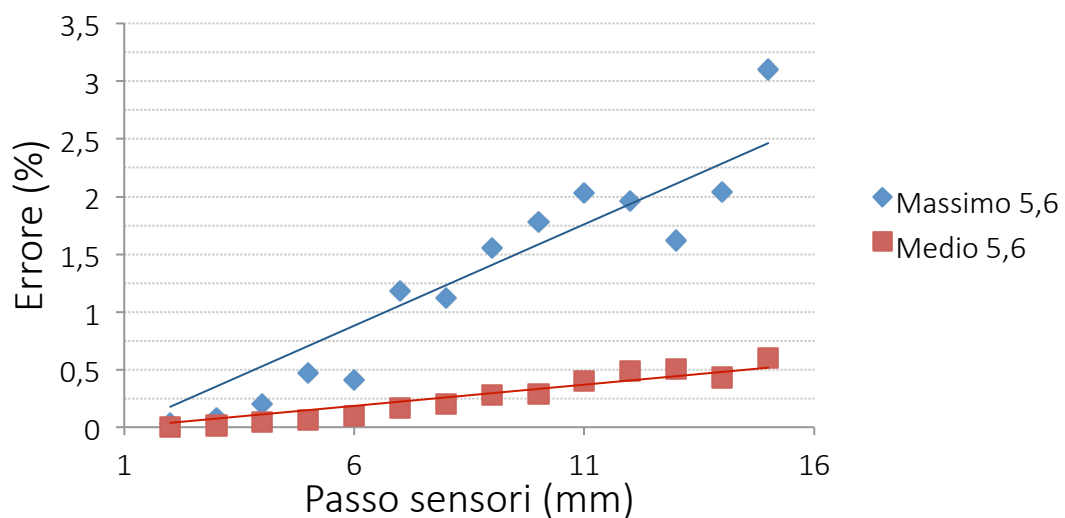


Fig. 6. 15

Passo [mm]	Errore Medio Velocità [%]	Errore Massimo Velocità [%]	n. sensori
2	0,006	0,03	77
5	0,07	0,47	33
10	0,29	1,78	17
15	0,61	3,10	13

Tab. 6. 7

Errore Determinazione Velocità - confronto

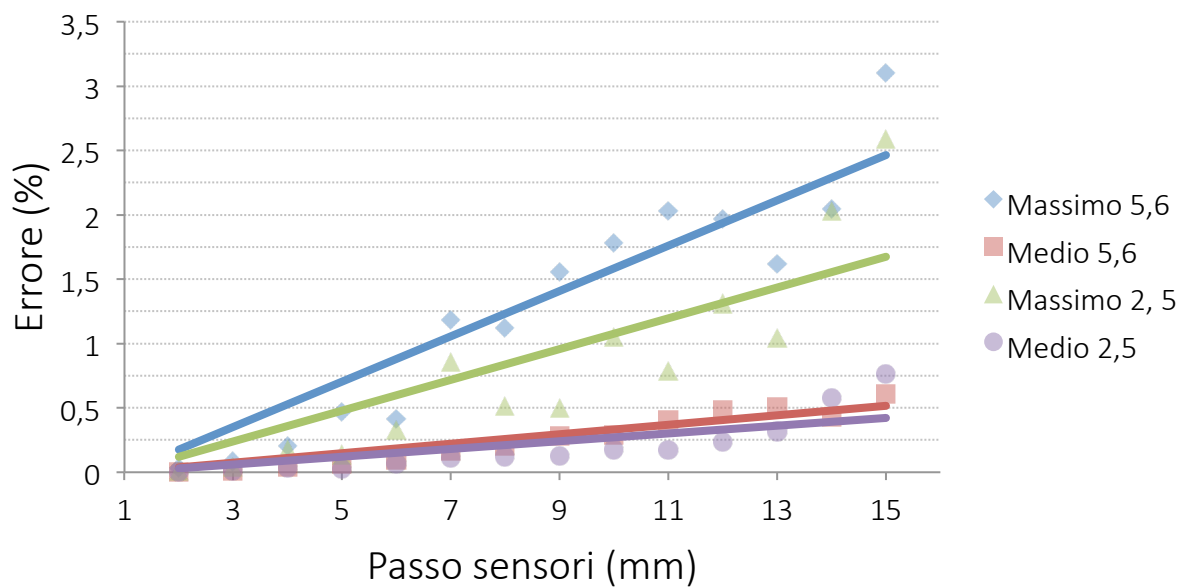


Fig. 6. 16

Anche in questo caso, infatti, gli errori percentuali sono maggiori, in modo particolare per quanto riguarda i valori massimi registrati.

Infine, a completamento dell'analisi è riportato nel seguente grafico l'andamento del picco di aspirazione della sezione alta della vela al variare dell'incidenza:

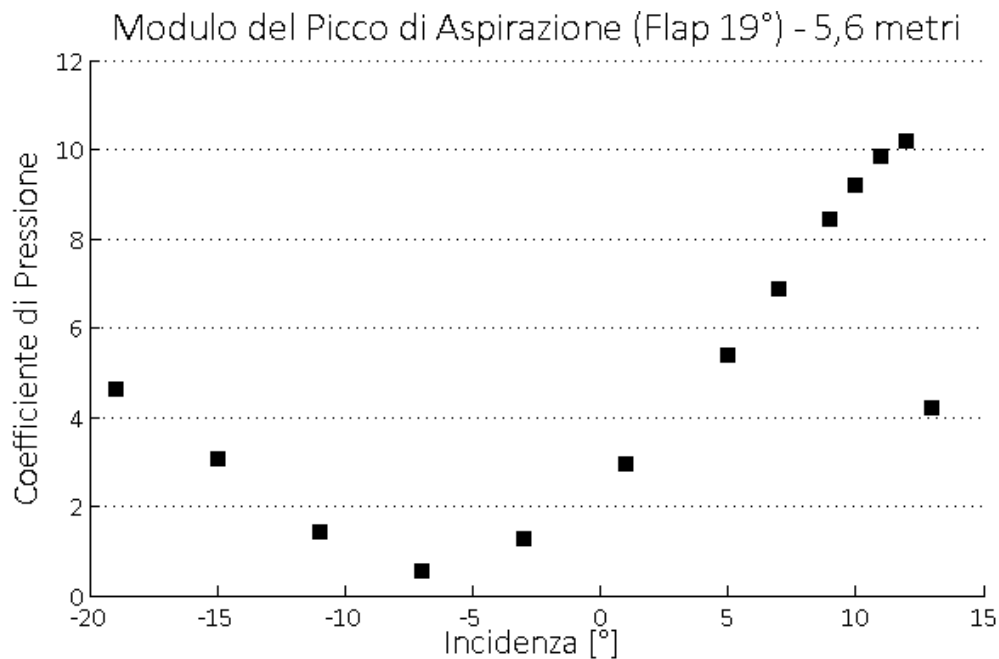


Fig. 6. 17

Come era ragionevole aspettarsi, in questo caso il crollo del picco di aspirazione risulta nettamente più marcato; tuttavia, continua a valere la considerazione fatta in precedenza, per cui quest'informazione diventa una valida indicazione se accompagnata da un monitoraggio in tempo reale dell'andamento della misura in esame.

Ampiezza della porzione strumentata

Come si è potuto osservare nel capitolo precedente, quando il flap è posto a 35° di deflessione non è più possibile lavorare in modo efficiente, e la vela si comporta come un corpo tozzo anche per bassi valori dell'incidenza del *main*, mostrando un flusso che separa sul *flap*.

Si vuole conoscere la lunghezza della zona strumentata, ovvero la lunghezza della striscia di sensori da posizionare sul bordo d'attacco al fine di riuscire efficacemente a determinare il

punto di ristagno nelle diverse condizioni di navigazione. Per ricavare la posizione più arretrata del punto di ristagno si analizza la condizione di massima deflessione ammissibile.

Per il flap posto a 31° di deflessione si trova che il punto di ristagno in condizioni di massima portanza si sposta sul ventre in una posizione che giace a 11,2 cm di ascissa curvilinea dal bordo d'attacco per la sezione posta a 2,5 metri di altezza dall'origine del sistema di riferimento e a 8,6 cm per quella a 5,6 metri.

Conclusioni

Dall'analisi effettuata circa l'influenza della spaziatura con cui sono disposti i punti di misura sull'entità dell'errore commesso nella valutazione della posizione del punto di ristagno e della velocità, si può dedurre come la scelta di un criterio di sensorizzazione risieda essenzialmente nella ricerca di un compromesso tra l'accuratezza richiesta e il numero dei sensori necessari per strumentare la porzione utile di bordo d'attacco del main. La dimensione dei sensori può rappresentare un vincolo inferiore al valore del passo ammissibile, a meno che non siano disposti su strisce adiacenti a quote leggermente differenti.

Se si considera il modello analizzato, una spaziatura di un centimetro sembra ragionevole sia in termini di realizzabilità sia in termini di accuratezza, considerando unicamente l'errore dovuto all'interpolazione. La decisione, tuttavia, dipenderà di volta in volta anche da valutazioni legate al diverso problema che si sta esaminando, dove anche solo una diversa *scala* dell'oggetto può portare a risultati o vincoli completamente differenti.

Fino a questo momento, inoltre, non è stata considerata in alcun modo la *risoluzione* dello strumento; è ragionevole immaginare che essa possa avere un'influenza estremamente importante sui risultati, in quanto responsabile di un'incertezza ineliminabile che questa volta prediligerebbe una maggiore spaziatura nella disposizione dei sensori, per far sì che l'errore assoluto dovuto alla *precisione* dello strumento si ripercuota in maniera più contenuta su misure che si discostano già discretamente. Una maggiore accuratezza, di contro, non porterebbe miglioramenti nella valutazione del punto di massimo della parabola interpolante, dato che questo non si sposterebbe traslandola verso valori di pressione maggiori o minori. Quest'ultima, quindi, inciderebbe solo nella valutazione della velocità attraverso la misura della pressione totale. Tali considerazioni saranno riprese in seguito.

Si mostrano alcune immagini di esempio di una possibile lettura data da una striscia di sensori di passo 1 cm nella sezione a 2,5 metri dall'origine del sistema di riferimento.

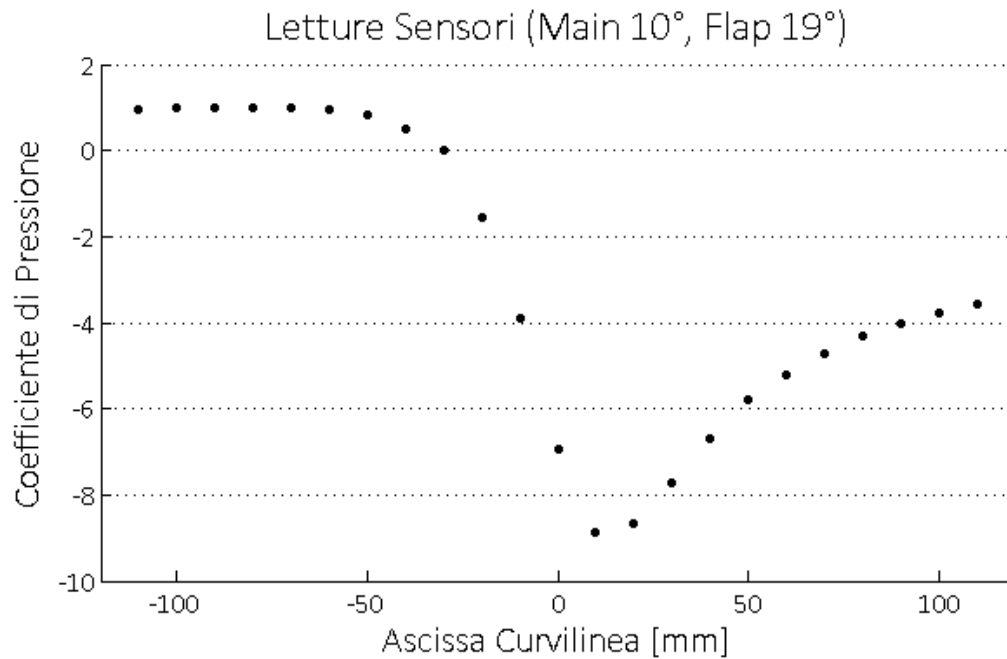


Fig. 6. 18

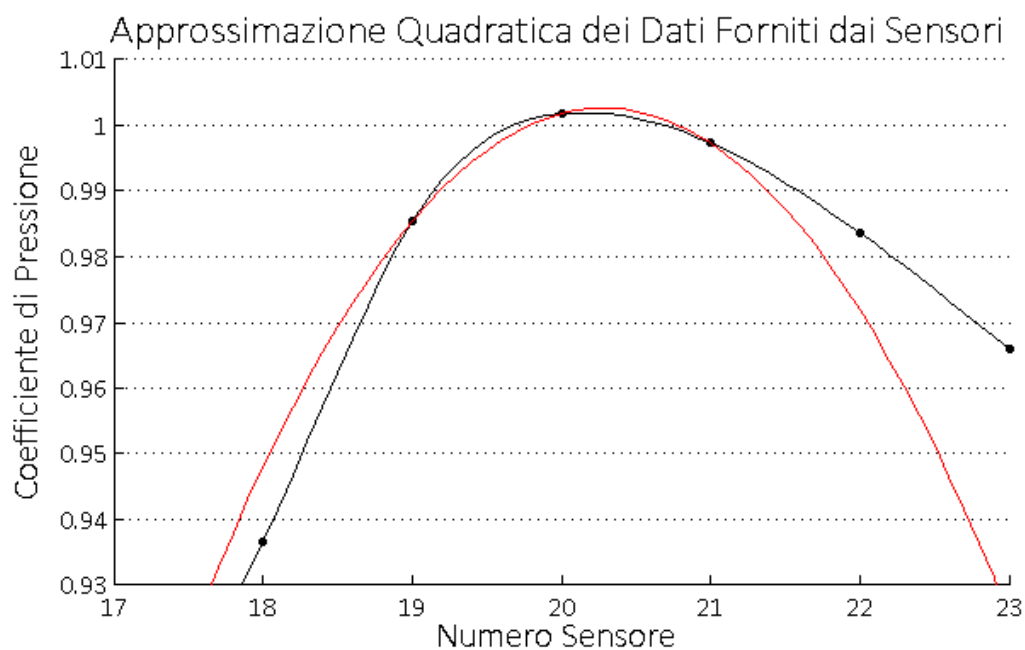


Fig. 6. 19

Si osservi che per convenzione la numerazione dei sensori è stata imposta dal dorso verso il ventre lungo l'ascissa curvilinea.

Dal primo grafico si può notare che l'andamento macroscopico del coefficiente di pressione nell'intorno del punto di ristagno appare piuttosto piatto. Ciò porta naturalmente a far pensare alla necessità di uno strumento preciso per individuare lungo l'asse delle ascisse la posizione corrispondente al valore di massimo.

Si vuole quindi definire il requisito sulla risoluzione del sensore per consentire una più valida applicazione dell'approccio illustrato.

Precisione dello strumento

Si supponga inizialmente di disporre i sensori con passo di 1 cm. Per consentire il corretto funzionamento della procedura descritta sinora è necessario che la risoluzione dello strumento di misura sia in grado di garantire l'individuazione corretta del sensore misurante il valore di massimo di pressione sul corpo; in caso contrario, l'errore commesso nella determinazione del punto di ristagno potrebbe superare il valore del passo tra i punti di misura e la predizione non sarebbe soddisfacente.

Ciò si traduce nel fatto che la risoluzione sia inferiore alla minima differenza tra la pressione sul sensore che dovrebbe misurare il massimo e quella dei punti di misura adiacenti. In prima approssimazione, inoltre, si può quindi desumere che sia richiesta per lo strumento una precisione pari alla metà della risoluzione. Analizzando la sezione a 2,5 metri di altezza nella configurazione con flap deflesso di 19° , il valore minimo necessario per tale parametro è lo 0,2% del valore della pressione dinamica, mentre il valore medio tra le incidenze positive è di un ordine di grandezza superiore (circa l'1,5%). Questa differenza marcata può essere spiegata dal fatto che per alcuni valori dell'incidenza il punto di ristagno effettivo può trovarsi in una posizione tale che i valori misurati da due sensori adiacenti siano molto simili, e un errore di sensibilità dello strumento sulla misura possa diventare molto influente sulla valutazione dell'assetto.

A tal inconveniente si può facilmente rimediare abbandonando il presupposto iniziale di disporre un sensore centrato in corrispondenza del bordo d'attacco e applicare, invece, le diverse strisce in modo che esse siano sfalsate lungo l'altezza della vela e, in tal caso, si potrebbero scartare le misure per le quali la differenza tra due misure adiacenti sia inferiore a un determinato valore di soglia definito in base alla sensibilità dello strumento di misura.

Supponendo di adottare questo accorgimento, diventa ragionevole considerare come riferimento per le successive considerazioni il valore *medio* di risoluzione richiesta allo strumento.

A titolo di esempio, nel caso in cui l'incidenza del *main* sia pari a 5° , in un assetto di 19° di deflessione del flap, la differenza tra la pressione massima misurata e quella nel sensore adiacente è pari all'1,4% della pressione dinamica; in questo caso, quindi, si potrebbe richiedere una precisione dello strumento pari a $\pm 0,7\%$ della pressione cinetica. Se si considerano tutte le combinazioni di valori estremi sulle misure date dai sensori, si osserva che ai 2 mm di errore sulla misura del punto di ristagno dovuti all'interpolazione si aggiungono al più 3 mm nella direzione di allontanamento dal bordo d'attacco, portando l'incertezza sull'incidenza (dedotta dal calcolo della posizione del punto di ristagno) al valore di circa 1° .

Nel grafico seguente si rappresentato proprio questo caso, che è quello in cui l'errore finale commesso nella misura del punto di ristagno risulta maggiore. La curva verde rappresenta la distribuzione *vera* del coefficiente di pressione ricavata dalla CFD, quella blu la parabola interpolante nel caso di sensori esenti da incertezza di misura disposti con spaziatura di 1 cm e infine la rossa rappresenta la parabola interpolante nel caso appena descritto.

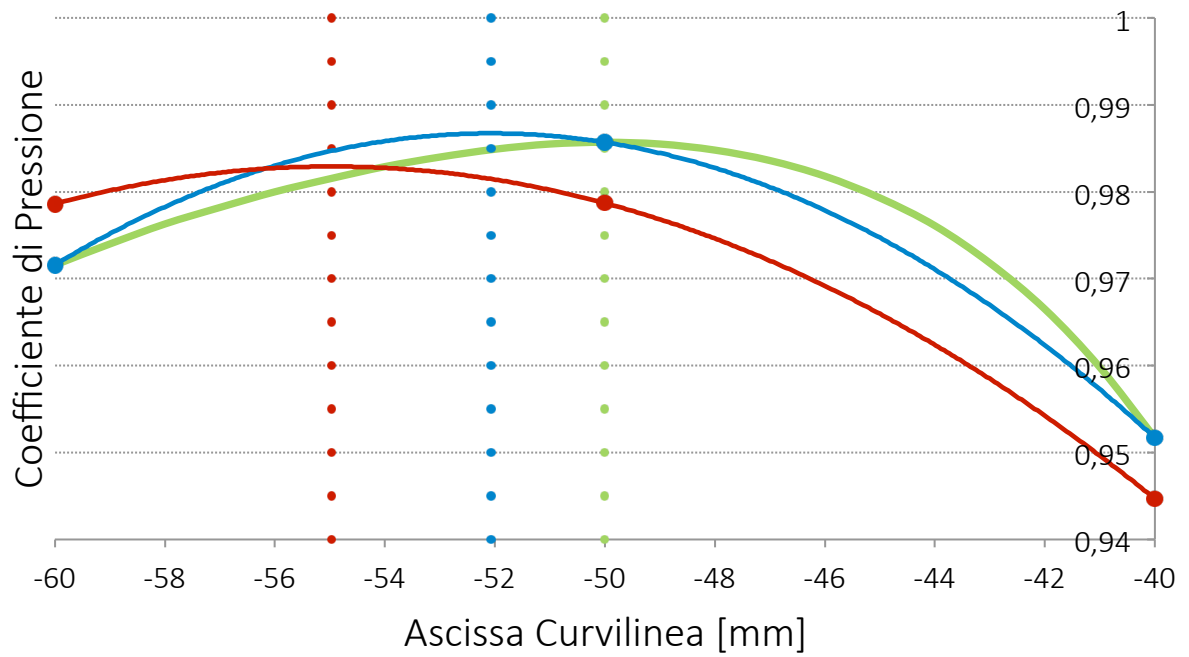


Fig. 6. 20

In una sezione posta a 5,6 metri di altezza la risoluzione richiesta allo strumento di misura è perfettamente analoga, con una differenza *media* tra due misure adiacenti, anche in questo caso, dell'1,5% del valore della pressione dinamica.

6.2 Sensorizzazione bordo d'attacco del flap

Scopo

Il bordo d'attacco del *flap* può essere sensorizzato in maniera analoga a quanto visto per il *main*, fungendo da ridondanza sul calcolo della velocità tramite la misura della pressione totale nel punto di ristagno e contribuendo nella definizione dell'assetto tramite la misura della posizione di quest'ultimo.

Anche in questo caso potrebbe essere utile eseguire una misura del valore del modulo del picco di aspirazione per avere un'indicazione dello stallo, sebbene nei risultati del capitolo precedente lascino immaginare che il calo dell'aspirazione sia meno marcato sul *flap*. Infatti, ad eccezione delle deflessioni più elevate, il soffiaggio continua a essere presente anche quando il flusso sul *main* è separato.

Anche in questo caso si farà riferimento per comodità al coefficiente di pressione in luogo della pressione differenziale.

In questo paragrafo, pertanto, saranno ripetute le analisi in precedenza eseguite, ripercorrendo lo stesso ordine e utilizzando il medesimo approccio.

Misura del punto di ristagno

La sezione della vela considerata come riferimento è la stessa analizzata per il *main*, lo strumento di misura (dato dalla striscia di sensori) analogo e i valori di riferimento, anche in questo caso, stabiliti dalle misure ottenute con passo di 1 mm.

Si riporta, innanzitutto, il grafico dello spostamento del punto di ristagno in funzione del valore dell'incidenza del *main* con una deflessione fissa di valore 19° .

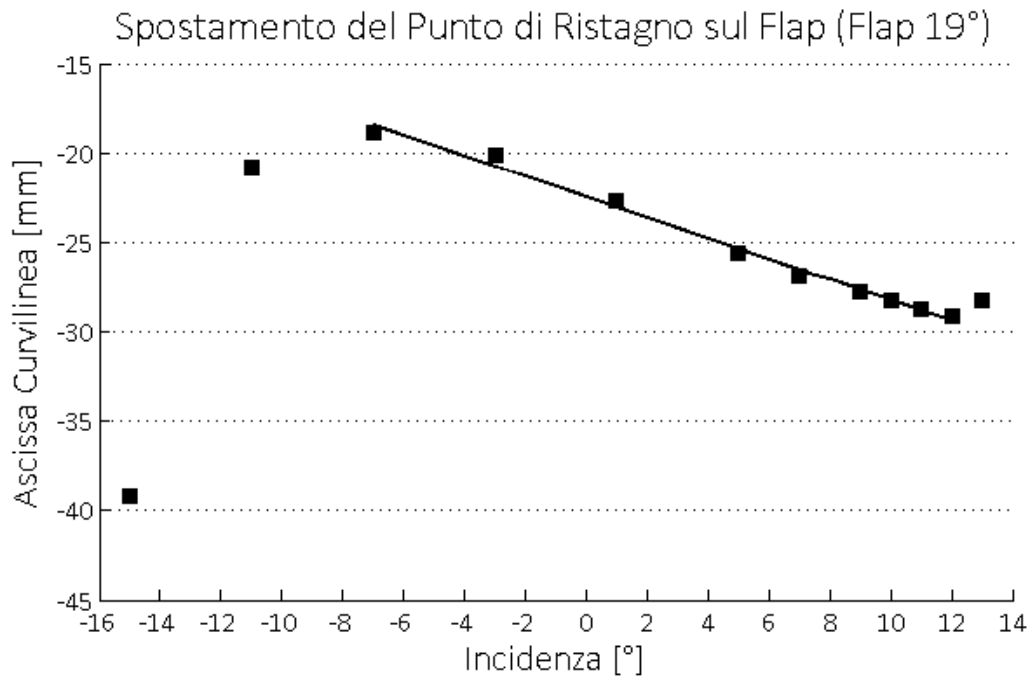


Fig. 6. 21

In questo caso, le misure si dispongono su una retta solo a partire da un certo valore di incidenza, e con una pendenza notevolmente rispetto al caso del *main*, di valore pari a circa -0,58. Il punto più arretrato tra quelli che si trovano nella zona ad andamento rettilineo è posto sul ventre in corrispondenza di un'ascissa curvilinea di circa 2,9 cm.

Per valori minori dell'incidenza il punto in cui è massimo il coefficiente di pressione si sposta considerevolmente verso il ventre e, gradualmente, si arriva a non assistere più alla presenza di un vero e proprio punto di ristagno, ragionevolmente in ragione del fatto che il *gap* si trova sempre più in ombra rispetto al flusso che investe il profilo. Ad esempio, il valore del coefficiente di pressione massimo misurato sul *flap* a -15° di incidenza e 19° di deflessione è pari a 0,74.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti ripetendo la medesima analisi di sensibilità alla spaziatura dei sensori svolta in precedenza.

Errore nella Determinazione del Punto di Ristagno

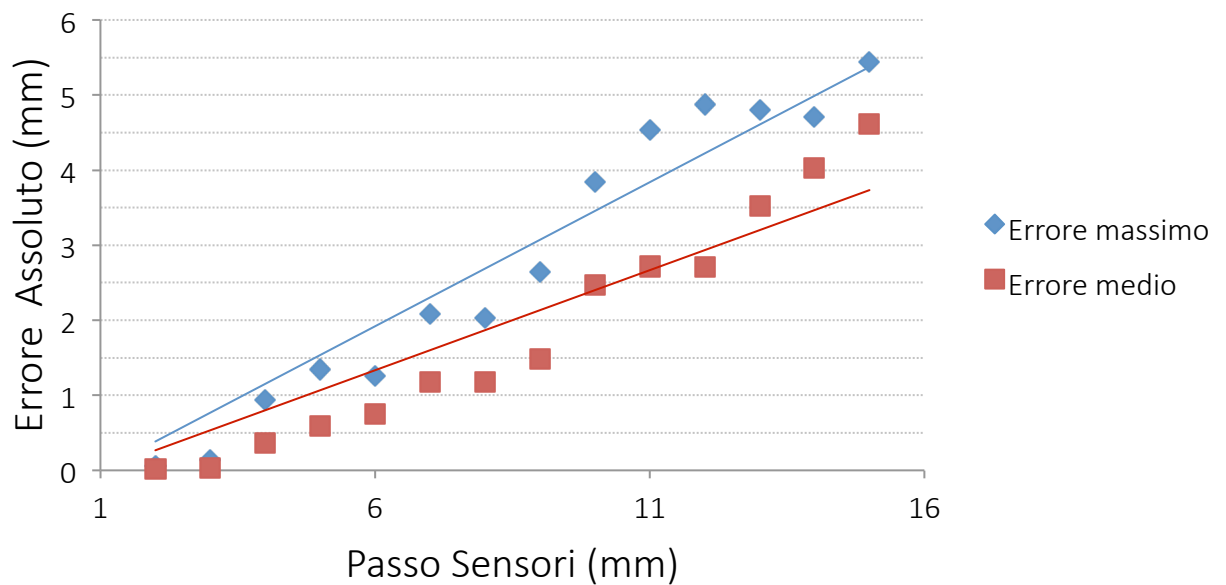


Fig. 6. 22

Passo [mm]	Errore Medio P.to Rist [mm]	Errore Max P.to Rist [mm]	Incert. Media Incidenza [°]	Incer. Max Incidenza [°]	n. sensori
2	0,01	0,07	0,02	0,11	33
5	0,60	1,34	1,03	2,31	15
10	2,47	3,85	4,25	6,63	9
15	4,62	5,44	7,96	9,38	7

Tab. 6. 8

Come era verosimile aspettarsi dalla ridotta pendenza della retta di spostamento del punto di ristagno e dalle minori dimensioni del *flap* rispetto al *main*, a parità di accuratezza richiesta sarebbe necessario utilizzare un passo tra i sensori certamente inferiore.

Si noti che i valori riportati nella colonna contenente il numero di sensori minimo necessario fa riferimento alla sola zona rettilinea compresa tra i -7° e i 12° di incidenza, dal momento che le configurazioni di minore incidenza non saranno certamente di interesse pratico per la navigazione, essendo molto prossime alla condizione di portanza nulla.

Anche in questo caso, poi, è stato possibile svolgere lo stesso tipo di studio al variare della deflessione del *flap* in un assetto di 11° di incidenza.

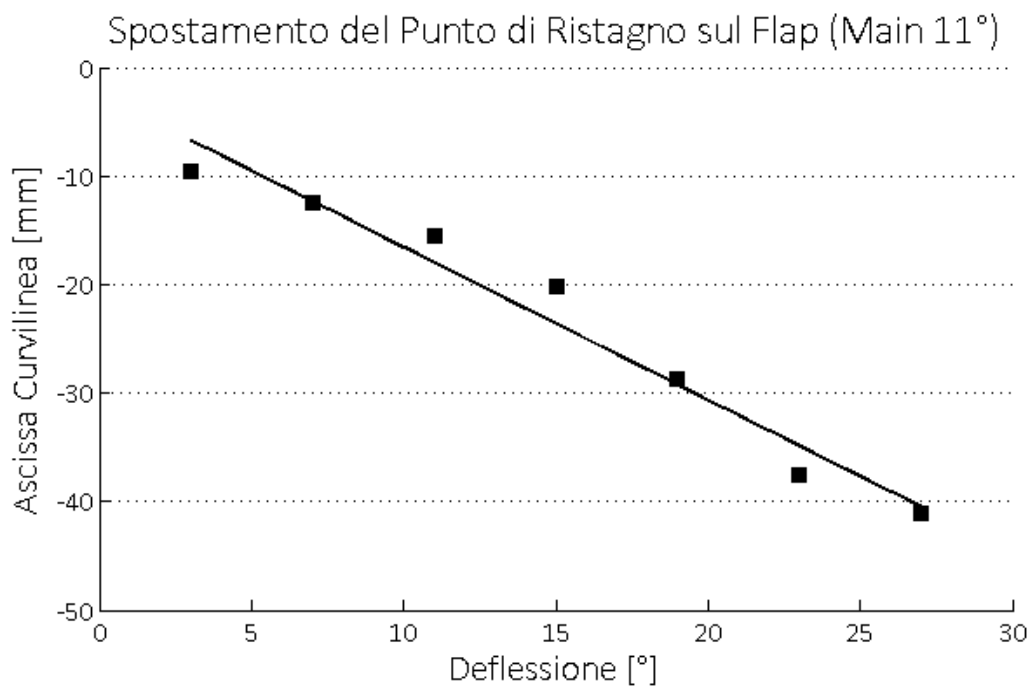


Fig. 6. 23

La pendenza della retta interpolante è di $-1,41$, e questo fornisce già un'indicazione di come la risposta sul bordo d'attacco del flap sia maggiore in rapporto a una deflessione del *flap* piuttosto che a una variazione dell'incidenza.

Lo stallo, in questo caso, non comporta un *riavvicinamento* della posizione del punto di ristagno verso il bordo d'attacco.

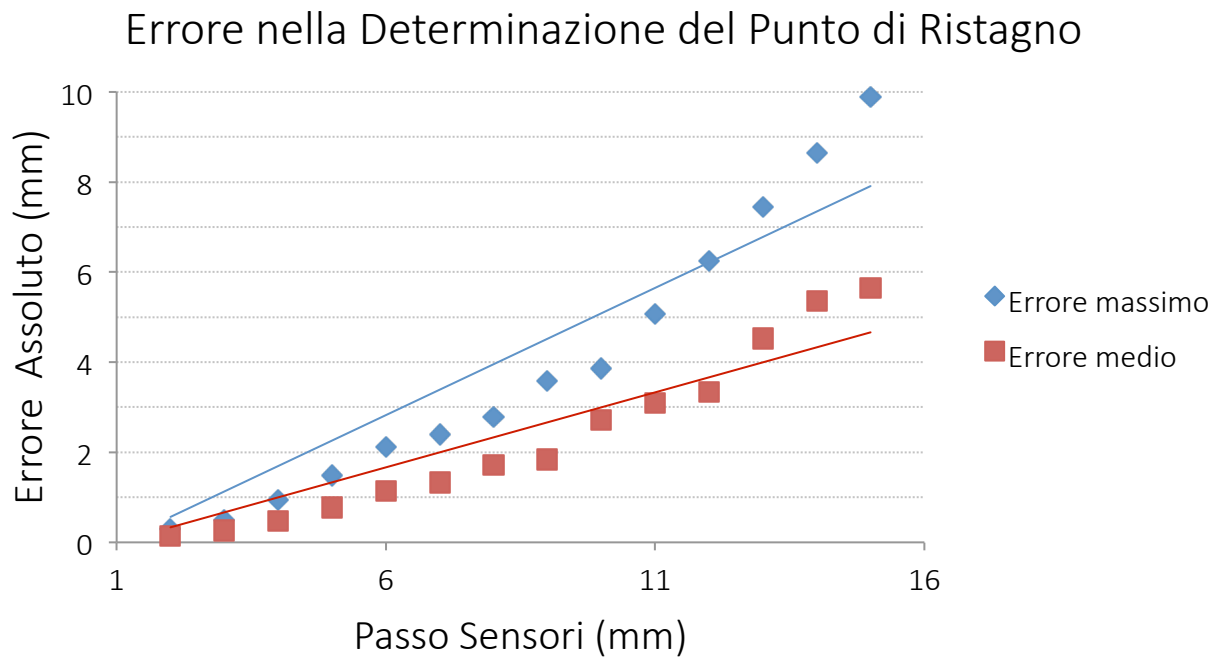


Fig. 6. 24

Passo [mm]	Errore Medio P.to Rist [mm]	Errore Max P.to Rist [mm]	Incert. Media Deflessione [°]	Incert. Max Deflessione [°]	n. sensori
2	0,13	0,29	0,09	0,21	45
5	0,77	1,48	0,55	1,05	19
10	2,70	3,86	1,92	2,74	11
15	5,65	9,89	4,00	7,01	9

Tab. 6. 9

In questo caso, come numero minimo di sensori è stato preso quello che riesce a misurare il punto di ristagno nella prima posizione stallata. Una trattazione più dettagliata valutazione riguardo all'ampiezza della zona da strumentare sarà svolta nel seguito.

Misura della pressione totale

Per la misura della velocità al variare della spaziatura tra i sensori valgono le medesime considerazioni fatte in precedenza.

Come già accennato, non è garantito che la massima pressione misurata dai sensori coincida davvero con la pressione dinamica; tuttavia, ciò accade solo per determinati valori dell'incidenza, che coincidono con quelli di interesse per la navigazione, per i quali la vela è in grado di sviluppare elevati valori di portanza.

Nell'analisi ci si è arrestati a un valore massimo del passo tra i sensori di 13 mm in luogo dei 15mm considerati fino a questo momento giacché, per un passo comparabile alla distanza del punto di ristagno dal bordo d'attacco, l'errore commesso subisce un'impennata verso valori massimi oltre il 15%.

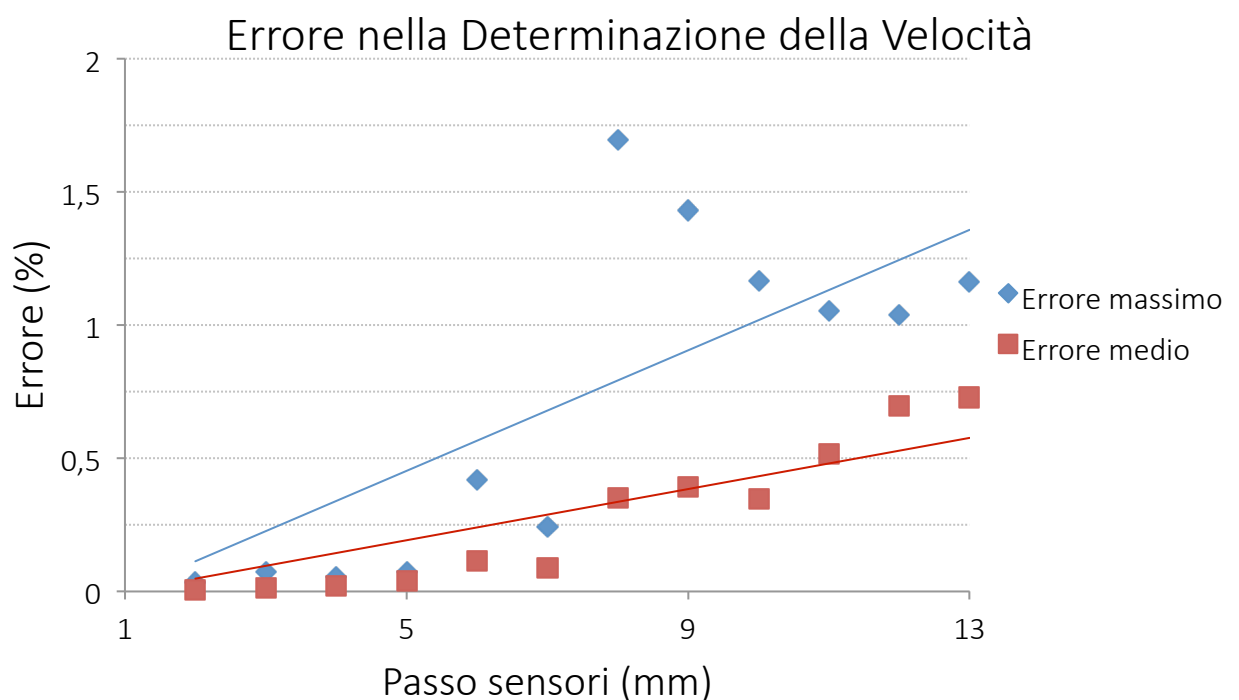


Fig. 6. 25

Passo [mm]	Errore Medio Velocità [%]	Errore Massimo Velocità [%]	n. sensori
2	0,006	0,03	45
5	0,04	0,07	19
10	0,35	1,17	11
13	0,73	1,17	9

Tab. 6. 10

L'errore ottenuto è comparabile a quello commesso effettuando la misura sul bordo d'attacco del *main*.

Misura del picco di aspirazione

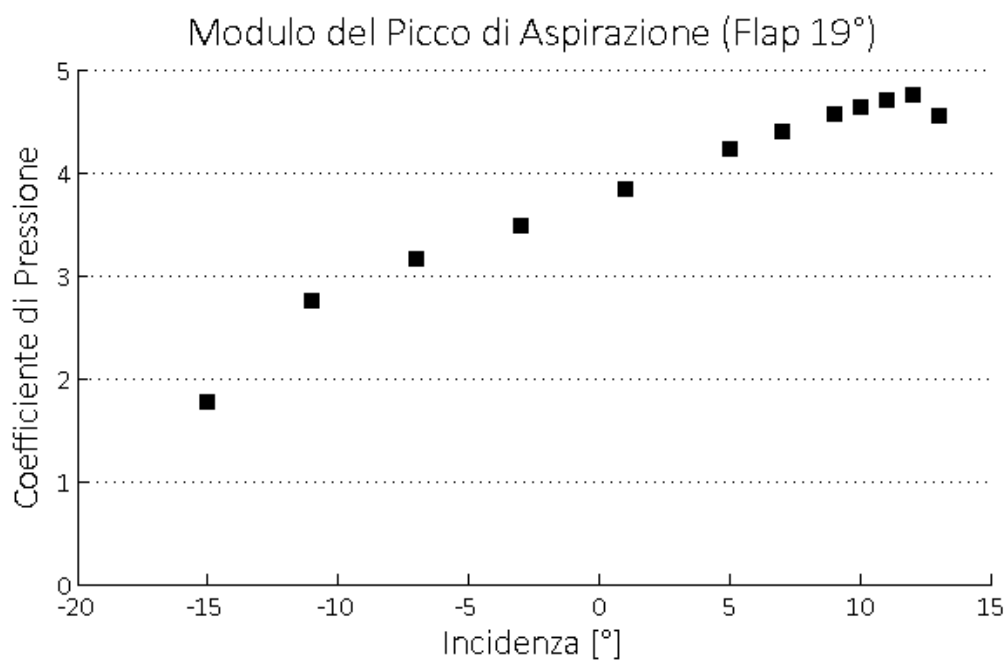


Fig. 6. 26

Si nota, innanzitutto, che la scomparsa del punto di ristagno (si ricorda che a -15° di incidenza veniva misurato un coefficiente di pressione massimo di circa 0,75) non corrisponde a una vera e propria scomparsa del picco di aspirazione, comunque presente a causa della curvatura convessa delle linee di corrente in corrispondenza del flap.

In ogni caso, anche sul *flap* il calo del picco di aspirazione in conseguenza dello stallo è di entità ridotta sulla sezione posta nella metà inferiore della vela.

Effetto della quota di misura

Se si ripete l'analisi spostandosi in una sezione posta nella metà superiore della vela a una altezza di 5,6 metri dall'origine del sistema di riferimento, si ottengono i risultati riportati di seguito:

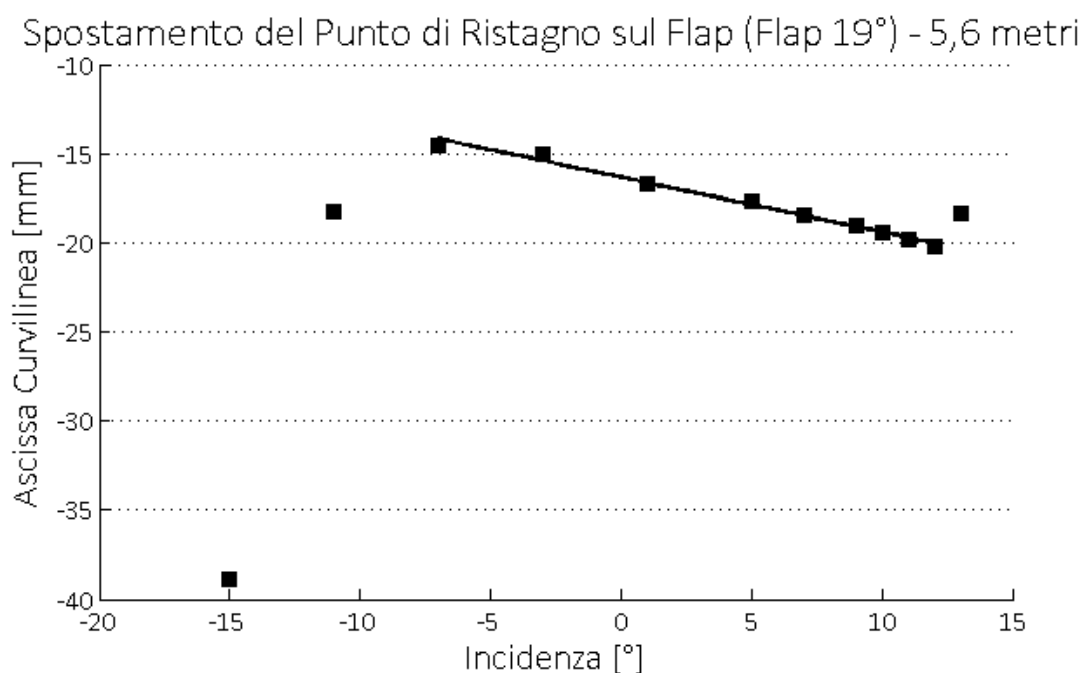


Fig. 6. 27

Anche in questo caso, l'andamento può essere considerato rettilineo a partire dall'incidenza di -7° , mentre per valori inferiori il punto di massimo del coefficiente di pressione si sposta verso il ventre in ragione della chiusura del canale tra le due vele. La pendenza del tratto lineare è pari a -0,31, e in corrispondenza della condizione di massima portanza il punto di ristagno si trova a circa 2 cm di ascissa curvilinea dal bordo d'attacco.

Errore Determinazione P.to di Ristagno - 5,6 metri

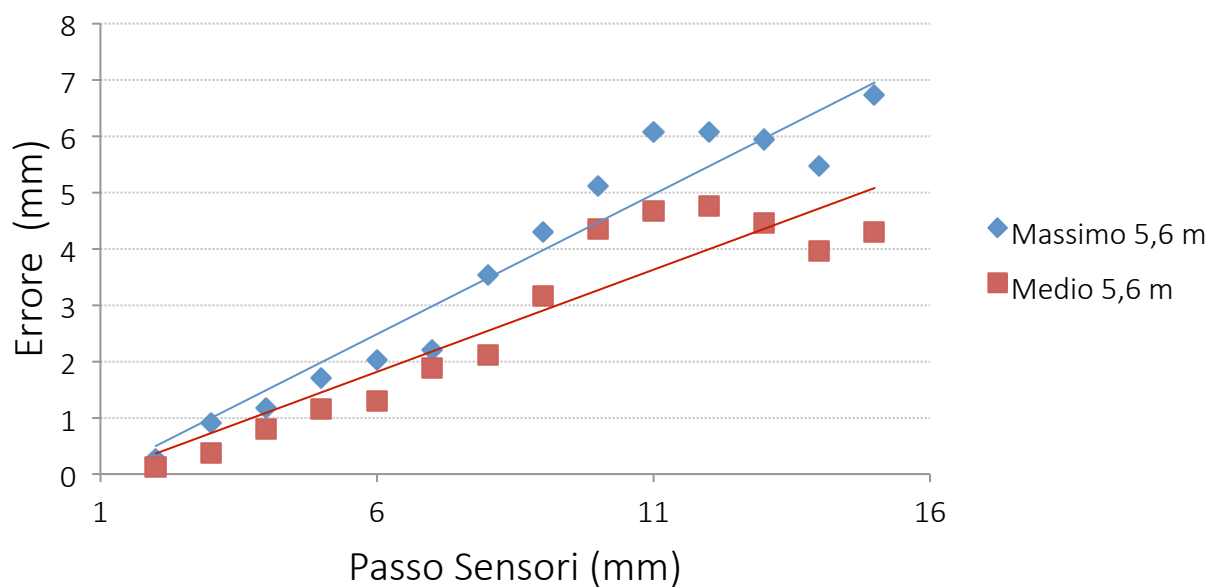


Fig. 6. 28

Passo [mm]	Errore Medio P.to Rist [mm]	Errore Max P.to Rist [mm]	Incert. Media Incidenza [°]	Incert. Max Incidenza [°]	n. sensori
2	0,12	0,27	0,38	0,87	33
5	1,15	1,71	3,71	5,50	15
10	4,35	5,11	14,0	16,5	9

Tab. 6. 11

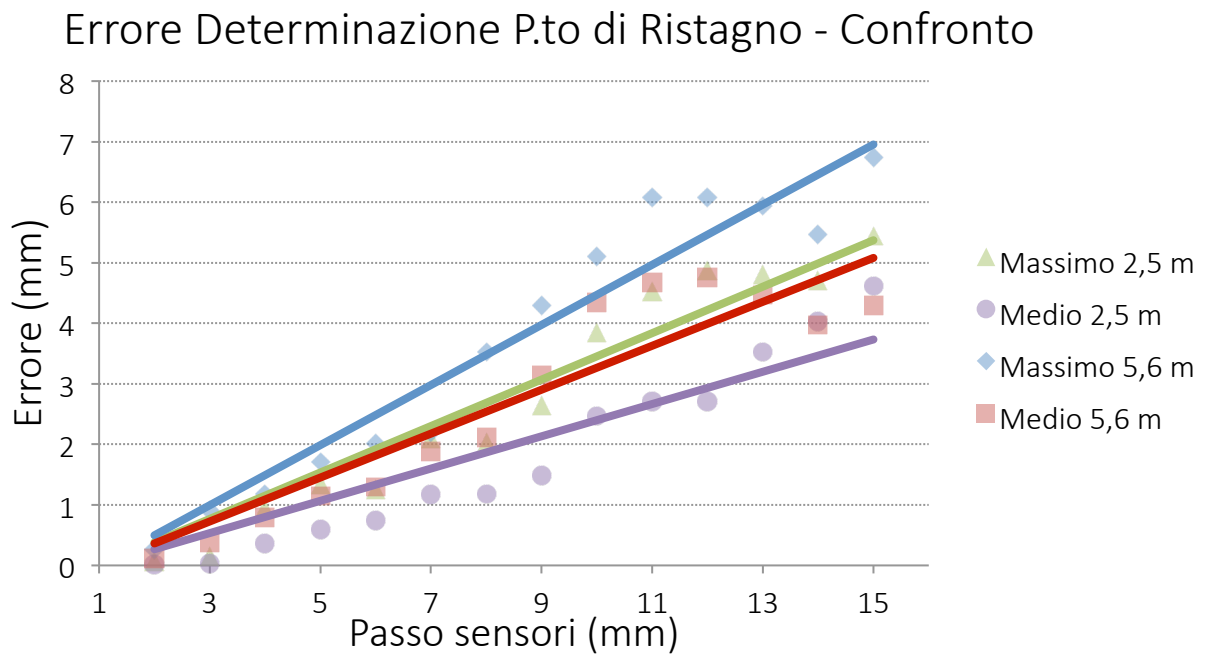


Fig. 6. 29

In questo caso, a differenza di quanto riscontrato per il *main*, gli errori commessi sembrano aumentare spostandosi verso quote più elevate sulla vela, a causa certamente delle ridotte dimensioni del flap e della modesta escursione del punto di ristagno al variare dell'incidenza.

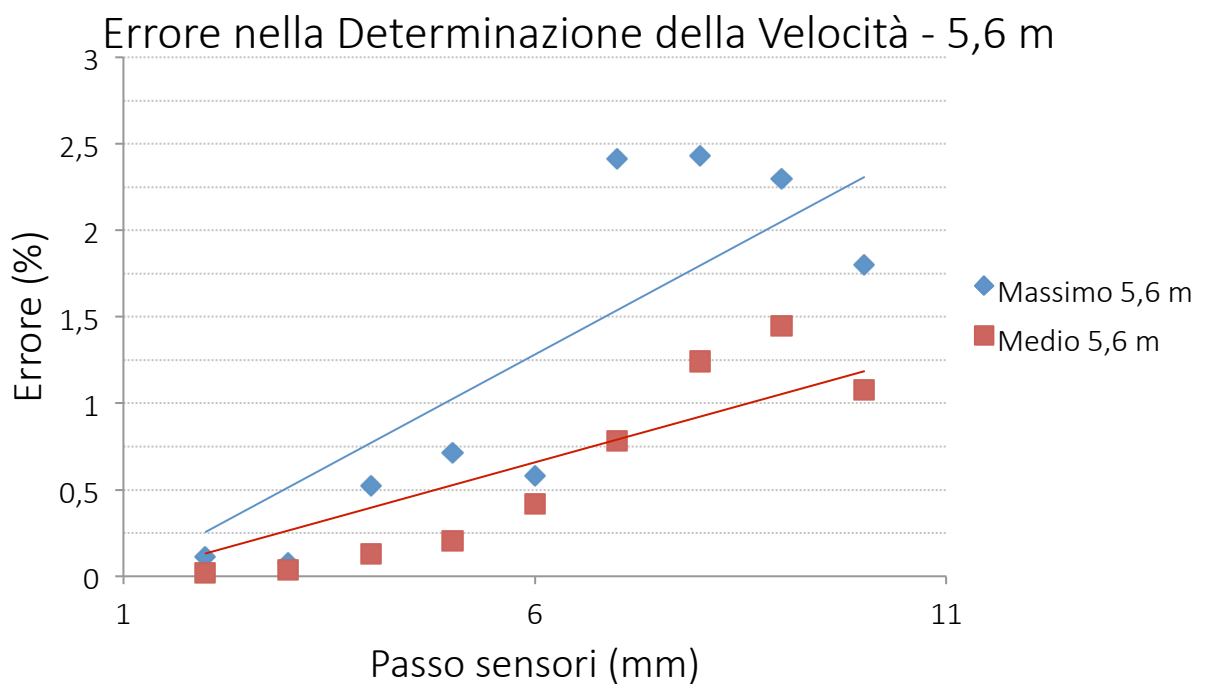


Fig. 6. 30

Passo [mm]	Errore Medio Velocità [%]	Errore Massimo Velocità [%]	n. sensori
2	0,02	0,11	45
5	0,20	0,71	19
10	1,08	1,80	11

Tab. 6. 12

Errore Determinazione Velocità - confronto

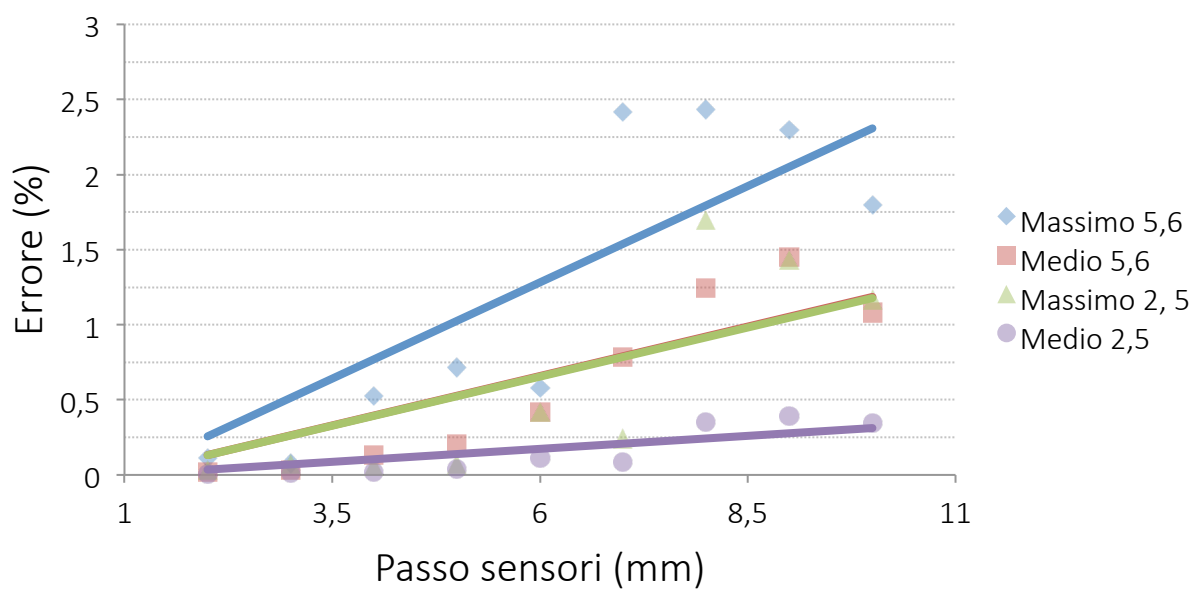


Fig. 6. 31

Com'era ragionevole aspettarsi, anche in questo caso gli errori percentuali sono più elevati, pur rimanendo contenuti per spaziature dei sensori fino a 1 cm.

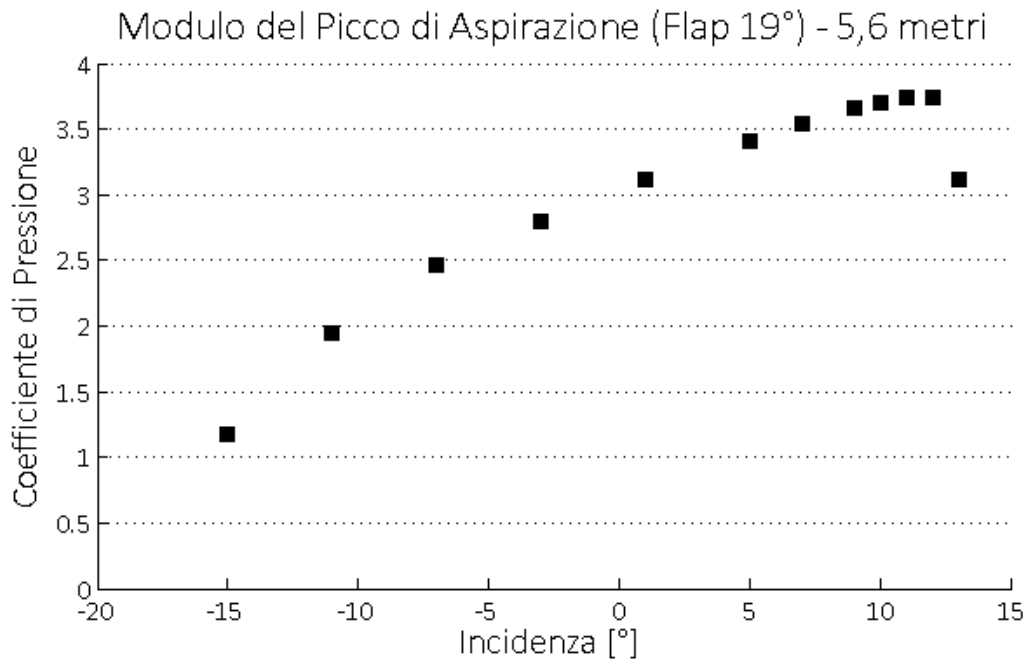


Fig. 6. 32

Il calo del picco di aspirazione allo stallo, anche se più marcato, resta contenuto, e la spiegazione di questo è da ricercarsi nel fatto che il soffiaggio tra parte primaria e secondaria della vela continua a essere presente anche per alti valori dell'incidenza.

Valgono le stesse considerazioni fatte nel caso del *main* riguardo alla necessità di un monitoraggio in tempo reale dell'andamento del picco di aspirazione per poter riscontrare il calo dovuto allo stallo. In ogni caso, l'indicazione ricavabile dalla sensorizzazione del *main* sarebbe sicuramente molto più efficace e manifesta.

Ampiezza della porzione strumentata

Nel caso di 31° di deflessione si osserva che il punto di ristagno in condizioni di massima portanza si sposta sul ventre in una posizione posta a circa 4,4 cm di ascissa curvilinea dal bordo d'attacco nella sezione a 2,5 metri di altezza e di circa -2,7 mm in quella a 5,6 metri.

Conclusioni

Nel caso del *flap*, una spaziatura dei sensori pari a quella scelta in precedenza per il *main* porterebbe certamente a risultati meno accurati, date le minori dimensioni e la ridotta escursione del punto di ristagno, in particolar modo al variare dell'incidenza.

In prima battuta, attraverso i risultati ottenuti, sarebbe preferibile scegliere un passo di 5 mm tra i diversi sensori per avere incertezze legate all'interpolazione analoghe, sebbene la valutazione della precisione dello strumento di misura possa suggerire il contrario.

Anche in questo caso, può trovarsi utile la visualizzazione di alcune immagini di esempio della lettura di una striscia di sensori disposta di passo 1 cm nella sezione a 2,5 metri di altezza.

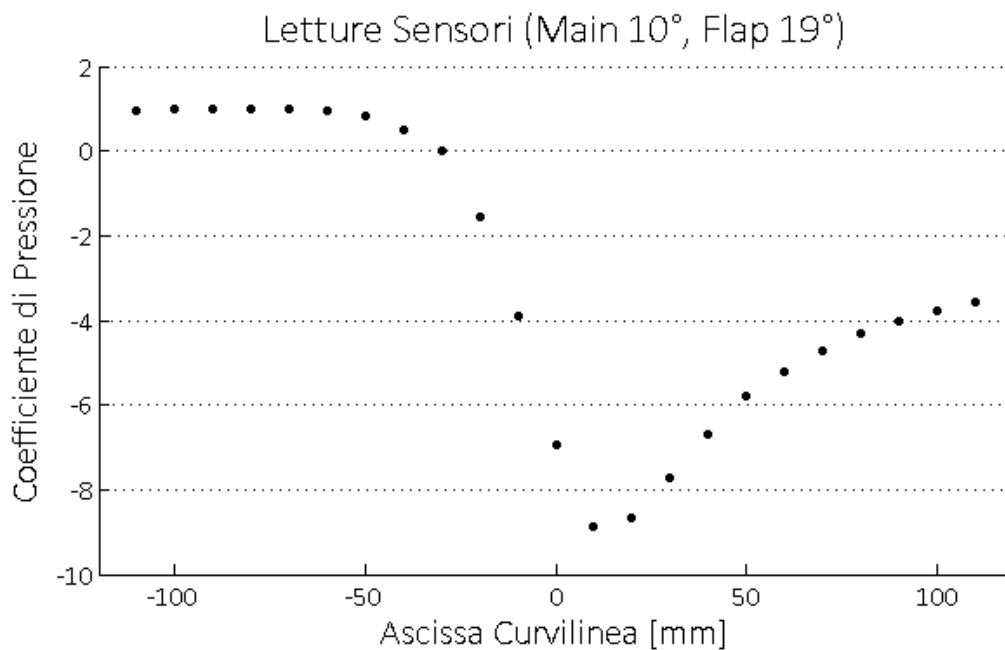


Fig. 6. 33

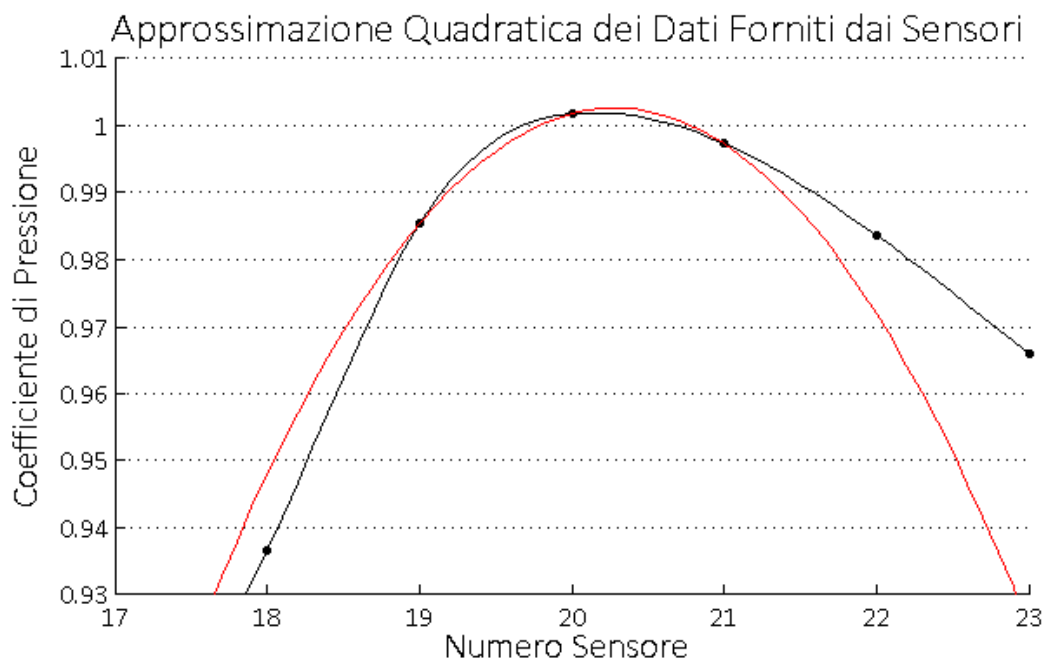


Fig. 6. 34

Come nel caso precedente, l'andamento del coefficiente di pressione non segue brusche variazioni in prossimità del punto di ristagno e, pertanto, un'analisi completa della sensorizzazione della vela non può certamente prescindere dalla considerazione tra le variabili di progetto della risoluzione dello strumento di misura.

Precisione dello strumento

In analogia a quanto visto per il bordo d'attacco del *main*, se si pensasse di richiedere una precisione dello strumento pari a $\pm 0,7\%$ del valore della pressione dinamica, non sarebbe certamente possibile selezionare una spaziatura tra i sensori di 5 mm come ipotizzato in quel caso, ma sarebbe necessario ricorrere a una spaziatura non inferiore a 7 mm. Ciò accadrebbe per evitare di incrementare eccessivamente gli errori commessi per l'eventualità di non selezionare correttamente il sensore che misura il massimo valore della pressione.

Per un passo di 7 mm l'errore *medio* nella determinazione della posizione del punto di ristagno dovuto all'interpolazione è di 1,2 mm (in allontanamento dal bordo d'attacco).

In una configurazione di assetto avente 11° di incidenza e 19° di deflessione del *flap*, nella quale la differenza nella pressione misurata da due sensori adiacenti in corrispondenza della

zona nella quale casca il punto di ristagno è pari all'1,3% del valore della pressione dinamica, si andrebbero ad aggiungere al più 1,8 mm di errore dovuti agli errori connessi alla risoluzione dello strumento nella valutazione della pressione.

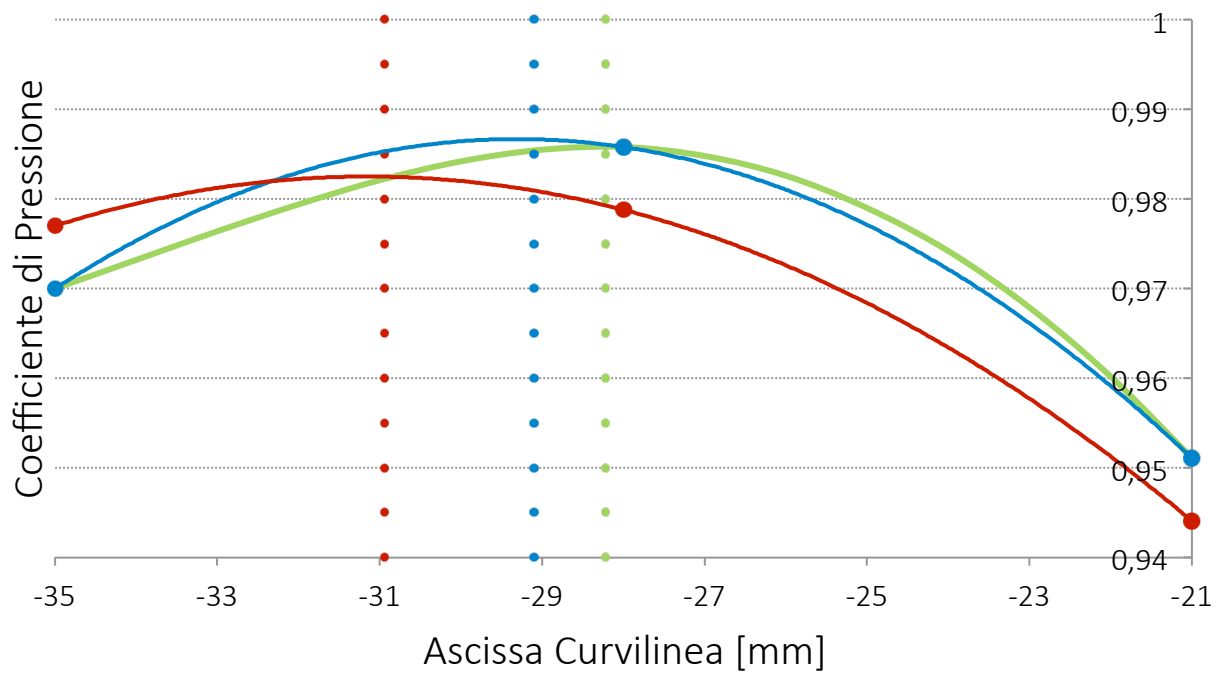


Fig. 6. 35

6.3 Sensorizzazione del bordo d'uscita del main

Scopo

Il bordo d'uscita del *main* può essere strumentato per cercare di ottenere maggiori informazioni riguardo allo stallo. In particolare, è ragionevole aspettarsi che in una zona in cui il flusso è separato il gradiente di pressione sul dorso abbia un andamento maggiormente appiattito rispetto a una zona nella quale il flusso resta attaccato.

Inoltre, potrebbe rivelarsi utile possedere un'indicazione di avvicinamento alla condizione di stallo; tuttavia, uno stallo improvviso come quello che caratterizza la vela in esame difficilmente consentirà un avvertimento di questo tipo, in termini di vicinanza alla condizione di stallo sia in incidenza sia in deflessione.

Infine, il fatto che i profili della vela abbiano elevata curvatura al bordo d'attacco dà luogo a un andamento del coefficiente di pressione con due picchi di aspirazione molto localizzati intorno alle zone di massima curvatura di *main* e *flap*, mentre il gradiente di pressione non osserva marcate variazioni spostandosi lungo il dorso del profilo verso il bordo d'uscita.

Lo scopo principale del paragrafo è analizzare la sensibilità della misura rispetto al posizionamento della zona sensorizzata e alla sua dimensione e, quindi, studiare l'influenza del numero di sensori utilizzati e della loro risoluzione.

Andamento del coefficiente di pressione

Nel caso del bordo d'attacco, lo sviluppo di un criterio di sensorizzazione è stato piuttosto intuitivo, giacché il comportamento fisico non si discostava da quello di casi simili di cui erano note le proprietà fondamentali. Nel caso della separazione del flusso, invece, si è reso necessario lo studio preliminare del comportamento allo stallo della specifica vela oggetto di studio. Infatti, il fenomeno avviene in modalità differenti a seconda della forma del corpo che si prendono in considerazione e delle condizioni di lavoro, descritte in particolare dal numero di Reynolds; per ognuna di queste varianti il tipo di sensorizzazione richiesto potrebbe essere differente.

Si richiamano in questa fase i risultati già discussi nel capitolo precedente. In particolare, i grafici seguenti mostrano l'andamento del coefficiente di pressione sul dorso del *main* a cavallo dello stallo (12° e 13° di incidenza) per la configurazione a 19° di deflection del *flap*.

Coefficiente di Pressione sul Main (Sezione 2,5 m)

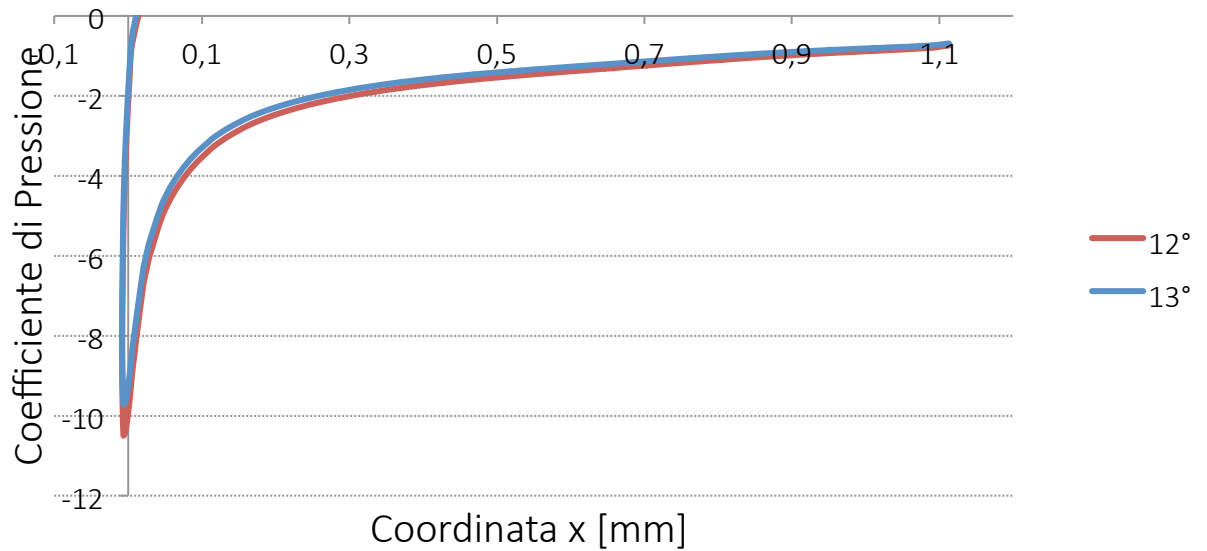


Fig. 6. 36

Coefficiente di Pressione sul Main (Sezione 5,6 m)

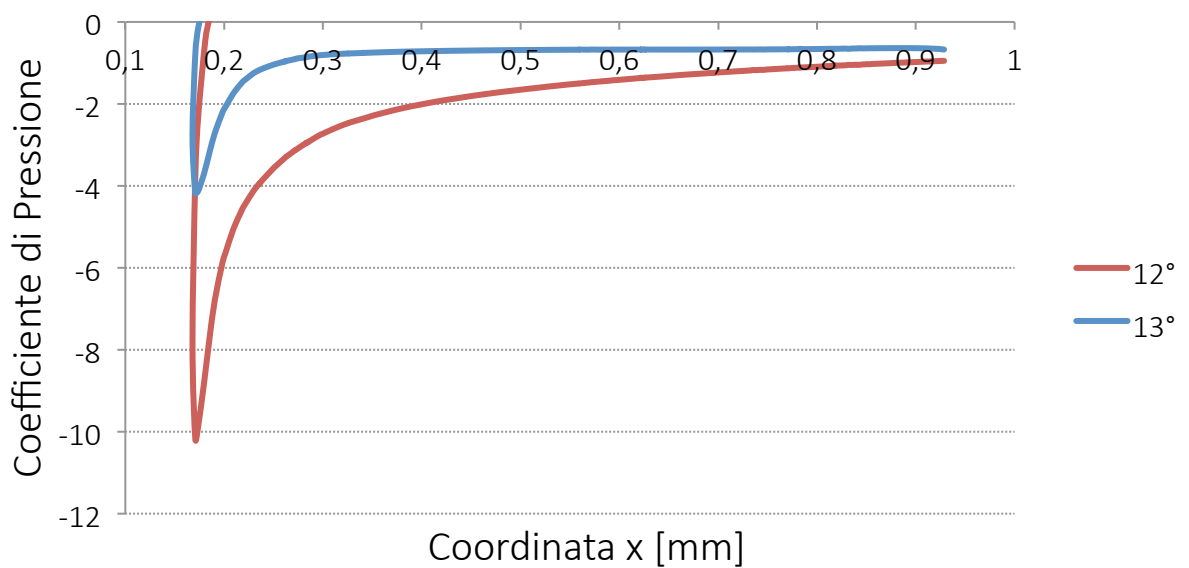


Fig. 6. 37

Dai grafici appare evidente che, poiché la vela è soggetta a uno stallo di estremità, la sezione a 2,5 metri di altezza non risente considerevolmente del fenomeno, e il flusso rimane attaccato, registrando appena un piccolo calo nel picco di aspirazione.

Nella sezione a 5,6 metri di altezza, invece, l'effetto è evidente: in particolare, questo si riflette in un calo apprezzabile del picco di aspirazione al bordo d'attacco, come analizzato nel precedente paragrafo, e in un gradiente di pressione pressoché nullo su gran parte del dorso.

Un'altra particolarità è data dal fatto che la variazione nell'andamento del coefficiente di pressione, passando dai 12° ai 13° di incidenza, è più marcata verso il bordo d'attacco che verso il bordo d'uscita, in corrispondenza del quale, in effetti, il gradiente di pressione appare modesto anche nel caso di flusso attaccato.

A prima vista, quindi, l'informazione ricavabile strumentando il bordo d'attacco e relativa al crollo del picco di aspirazione potrebbe sembrare non solo sufficiente, ma anche più evidente; di contro, la lettura di un determinato valore del picco di aspirazione corrispondente allo stallo senza uno storico delle misure effettuate e della variazione dell'assetto non fornisce necessariamente un'informazione facilmente interpretabile, mentre la misura di un gradiente nullo (o quasi) sarebbe un'indicazione chiara e inequivocabile (universale) della separazione del flusso.

I parametri da definire per la strumentazione sono il numero di sensori, il passo tra essi e la posizione alla quale disporli lungo il dorso del profilo. In linea teorica, per la misura di un gradiente è necessario disporre di almeno due misure, mentre la distanza tra essi si ripercuote inevitabilmente sulla differenza tra i valori delle pressioni misurate dai due sensori per un determinato valore del gradiente. Per quanto riguarda il posizionamento, infine, sarà certamente necessario disporsi a una distanza dal bordo d'attacco tale da garantire il flusso completamente separato allo stallo in corrispondenza dei sensori, per riuscire a misurare un valore di pendenza prossimo allo zero.

Sensibilità della misura al posizionamento

Nel corso dell'analisi si è partiti dall'ipotizzare di disporre due sensori sul dorso a distanza di 10 cm uno dall'altro e, in una sezione della vela posta a un'altezza di 5,6 metri dall'origine, è stato svolto un primo studio riguardo al posizionamento lungo l'ascissa curvilinea.

Nel grafico seguente sull'asse x è riportata l'ascissa curvilinea (con origine il bordo d'uscita) di posizionamento del punto centrale, equidistante dai due sensori. La curva rossa rappresenta una misura della differenza tra i valori di pressione misurati dai due sensori nella condizione subito antecedente lo stallo, tramite la relazione:

$$y_{\text{RED}} = (1 - \Delta c_p) \cdot 100$$

Più questo valore sarà minore di 100, più grande sarà la differenza tra i due valori di pressione misurati, e quindi minore la risoluzione richiesta allo strumento per l'efficacia della misura.

La curva verde, invece, rappresenta la misura del gradiente in condizione di flusso separato sul dorso, opportunamente scalata per dare una lettura di più facile interpretazione:

$$y_{\text{GREEN}} = 2 \cdot \frac{\Delta c_p}{\Delta s} \cdot 10^4$$

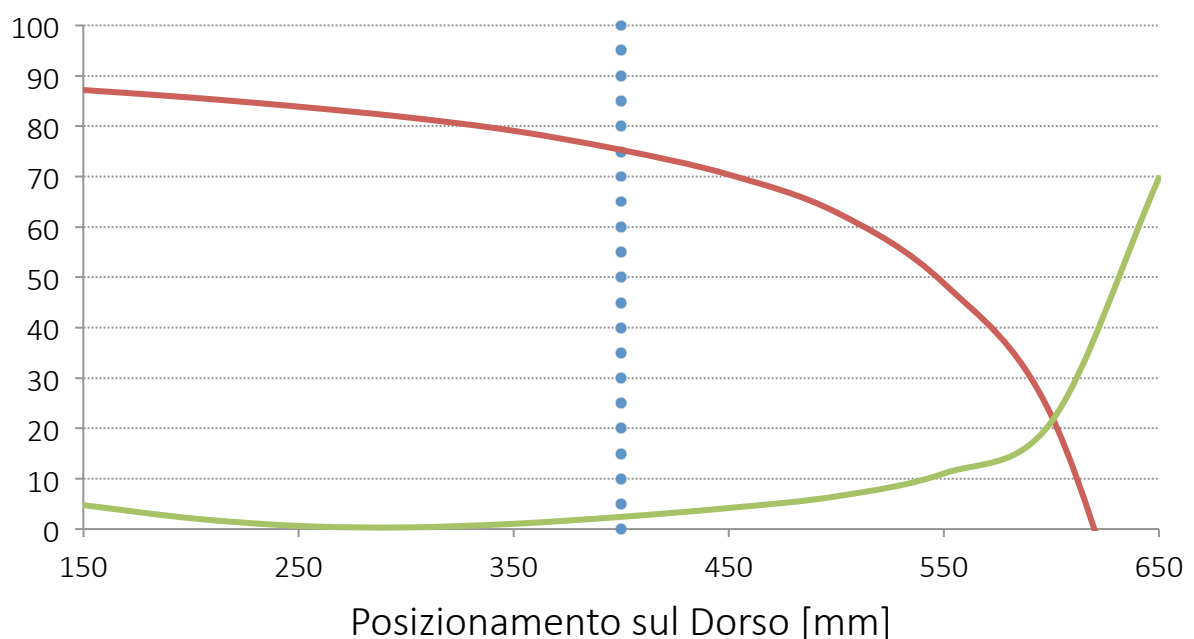


Fig. 6.38

Come introdotto in precedenza, nonostante gli effetti maggiori della separazione del flusso si risentano avvicinandosi verso il bordo d'attacco (il grafico conferma assolutamente questa caratteristica), lo scopo della strumentazione risiede innanzitutto nella possibilità di fornire una lettura di un valore del gradiente prossimo allo zero, in modo da essere un'indicazione immediata della separazione del flusso. Per questo motivo, si è scelto in prima battuta di posizionare i sensori centrati rispetto a un punto a 40 cm di ascissa curvilinea dal bordo d'uscita del main (nella sezione considerata).

L'analisi può proseguire per studiare la distanza intercorrente tra i due sensori selezionati. Il grafico seguente riporta le stesse grandezze introdotte in precedenza scalate in maniera differente per rendere la lettura agevole, grazie alle seguenti relazioni:

$$y_{\text{RED}} = \left(1 - \frac{\Delta c_p}{2}\right) \cdot 100 \quad y_{\text{GREEN}} = 5 \cdot \frac{\Delta c_p}{\Delta s} \cdot 10^4$$

In questo caso, come in precedenza, lo scopo consiste nell'aumentare la differenza di pressione misurata appena prima dello stallo senza rinunciare a mantenere i sensori all'interno della zona nella quale il flusso è separato e nella quale, quindi, il gradiente dopo lo stallo è pressoché nullo.

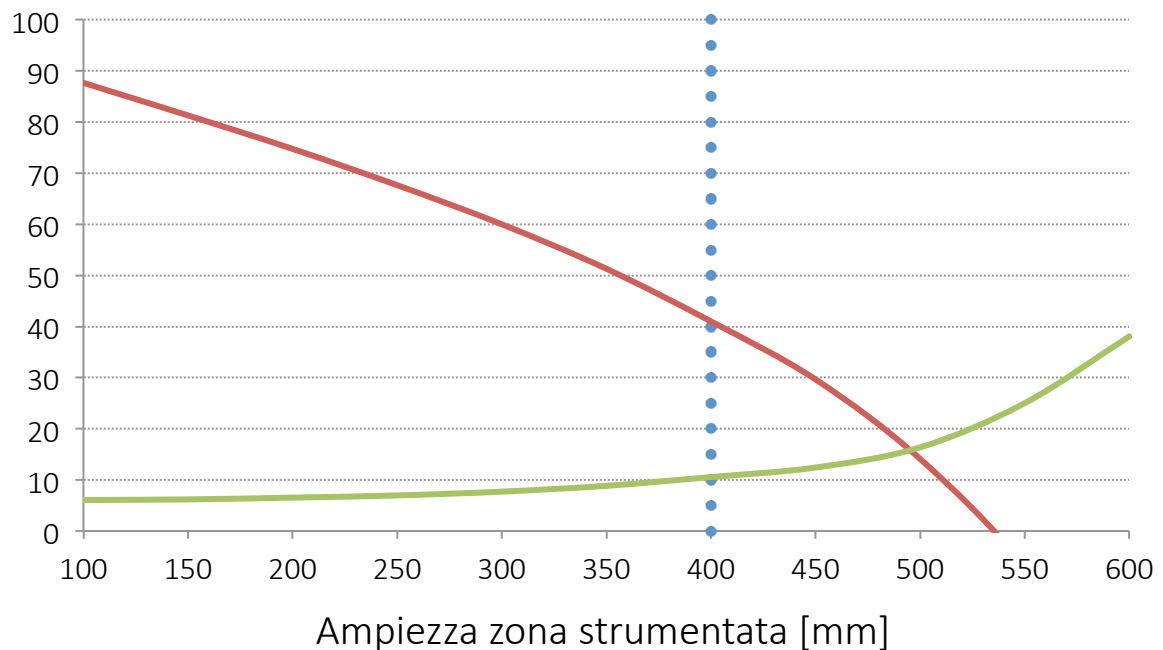


Fig. 6. 39

In base alle informazioni ottenute, una distanza dei sensori di 40 cm permette di soddisfare ancora questo requisito, mentre una distanza maggiore potrebbe cominciare a indebolire tale assunzione.

Per quanto riguarda, infine, l'influenza del numero di sensori che si potrebbe pensare di posizionare nella zona appena individuata, tra 20 cm e 60 cm dal bordo d'uscita, prima di tutto è bene notare che un suo aumento non comporterebbe alcun beneficio nella specifica di sensibilità dello strumento; per quanto riguarda, invece, l'influenza sulla misura del gradiente di pressione in condizioni di flusso separato lo studio ha confermato che l'andamento nella porzione considerata è effettivamente rettilineo, ragion per cui i miglioramenti sono assolutamente trascurabili.

La definizione del numero di sensori con cui strumentare il bordo d'uscita deriverà, quindi, esclusivamente da considerazioni riguardanti l'affidabilità del meccanismo di misura, e la scelta dell'eventuale ridondanza di cui dotare il sistema.

Precisione dello strumento

Grazie alla scelta di disposizione effettuata, il requisito di risoluzione dello strumento non pare in questo caso di particolare criticità, giacché la differenza di pressione misurata dai due sensori per incidenze positive nel caso in esame varia tra 0,5 e 1,2 volte il valore della pressione dinamica. Quello che invece deve essere tenuto in conto con particolare attenzione è il fondo scala dei sensori che, nella zona in esame, è pari a circa -3 volte il valore della pressione dinamica.

Conclusioni

Un esempio dell'andamento misurato al variare dell'incidenza da due sensori disposti a 20 cm e 60 cm di ascissa curvilinea dal bordo d'uscita è mostrato nel seguente grafico:

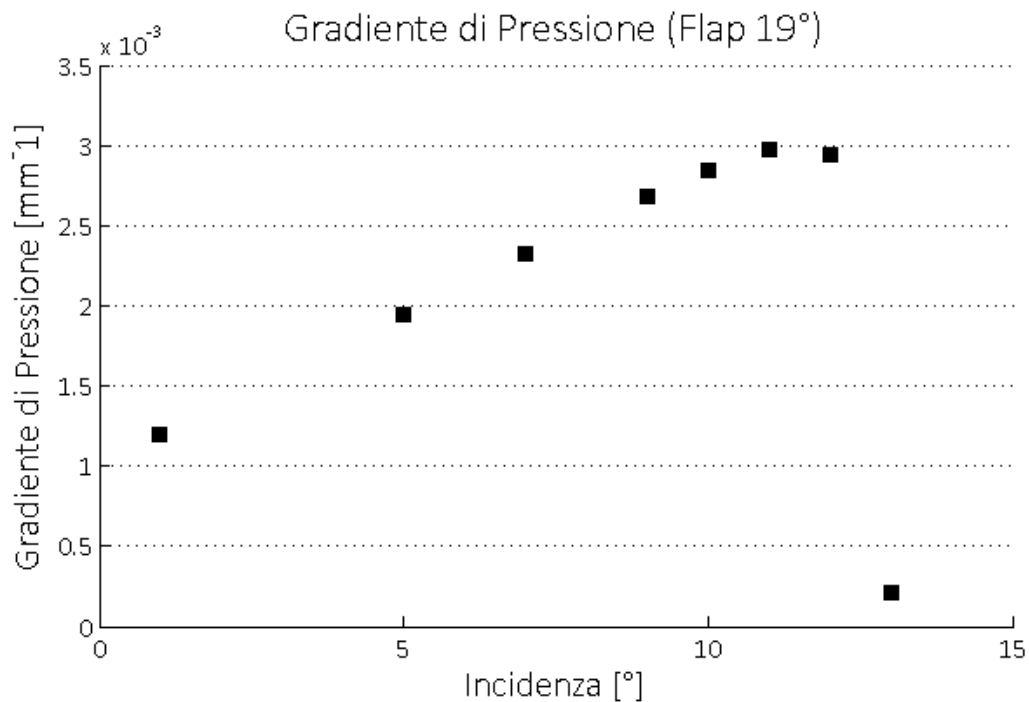


Fig. 6.40

Il gradiente è stato valutato sui coefficienti di pressione, ed è quindi adimensionalizzato sulla pressione dinamica. Alle basse velocità, quindi, le pressioni misurate saranno più piccole e, quindi, maggiormente affette da errore rispetto a quelle prese in condizioni di alta velocità.

Una più completa analisi di questo tipo di strumentazione non può prescindere dalla valutazione delle differenze nelle modalità di stallo che si possono avere per diversi valori della deflessione del *flap*, dello svergolamento, o del numero di Reynolds.

Si riporta, a titolo di esempio, l'andamento del coefficiente di pressione nella sezione di riferimento (5,6 metri dall'origine) a cavallo dello stallo per i casi di deflessione del flap pari a 3° e 31°.

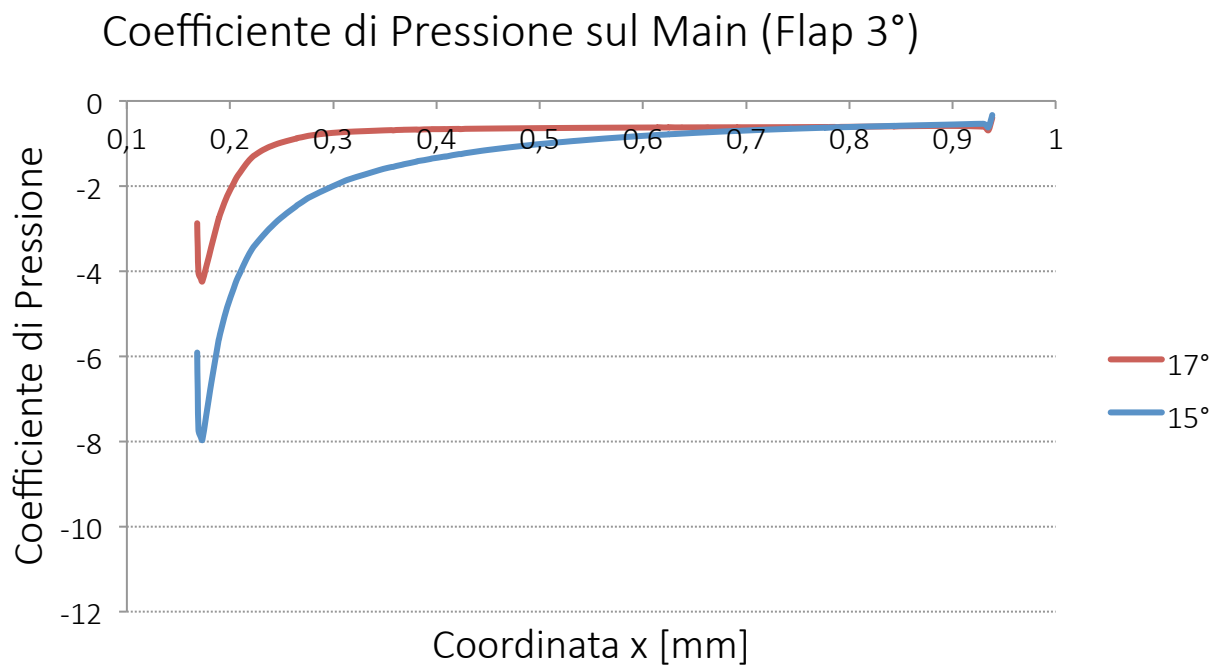


Fig. 6. 41

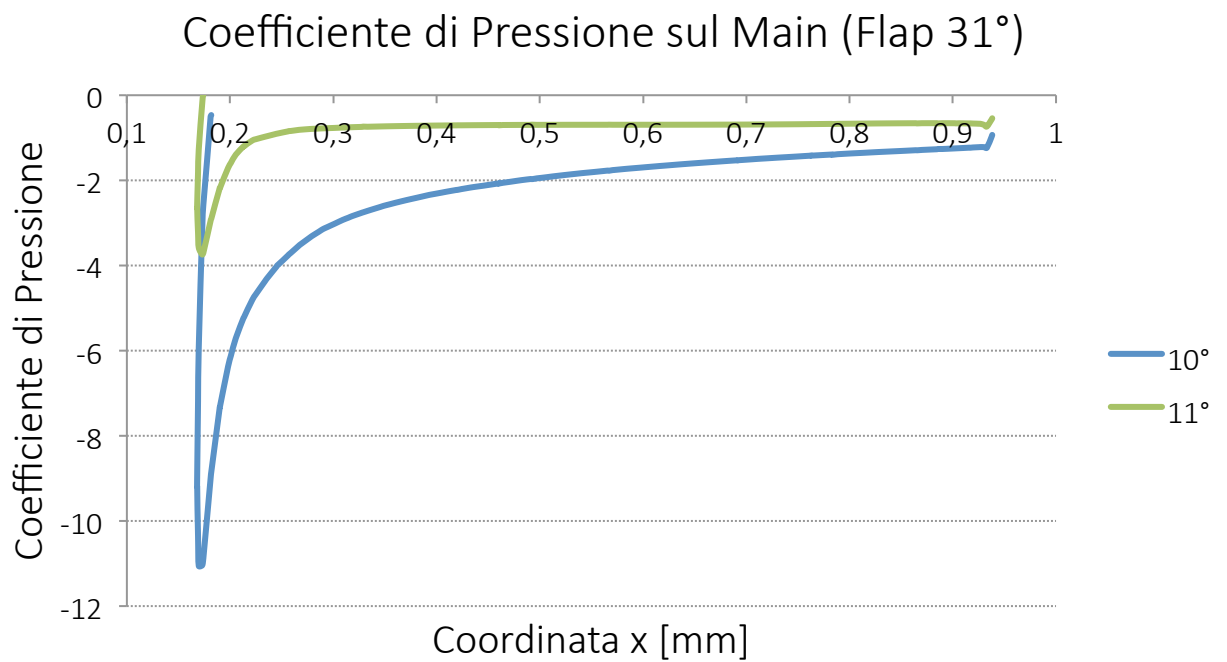


Fig. 6. 42

Si può notare che la porzione di dorso in cui il flusso è separato e il gradiente pressoché nullo si mantiene molto simile tra i vari casi, per cui si può ritenere che il posizionamento dei sensori sia adeguato anche in questi casi.

La differenza principale risiede nel fatto che, per piccole deflessioni del *flap* il valore del picco di aspirazione prima dello stallo è inferiore, e questo si traduce in una minore differenza di pressione misurata dai due sensori e da una maggiore risoluzione eventualmente da richiedere allo strumento. Pertanto, è evidente che quest'ultima condizione è quella che dovrà essere presa come riferimento per un'analisi della precisione effettivamente richiesta al sensore.

6.4 Sensorizzazione del bordo d'uscita del flap

Scopo

Lo scopo per il quale strumentare il bordo d'uscita del *flap* è analogo a quello visto per il *main*. L'interesse principale risiede soprattutto nell'individuare le differenze per ottenere, infine, gli strumenti necessari a valutare l'eventuale valenza di una sensorizzazione di questo tipo, in aggiunta o sostituzione a quella sul *main*.

È stata già posta l'attenzione nel corso dell'elaborato al fatto che il picco di aspirazione sul *flap* tende a non risentire in maniera marcata dello stallo a causa della presenza del *gap* attraverso cui il flusso continua a rienergizzare il dorso del *flap*.

Andamento del coefficiente di pressione

La visualizzazione dei grafici relativi all'andamento del coefficiente di pressione a cavallo dello stallo può risultare utile alla comprensione della strategia più indicata per dotare il dorso del flap di sensori di pressione.

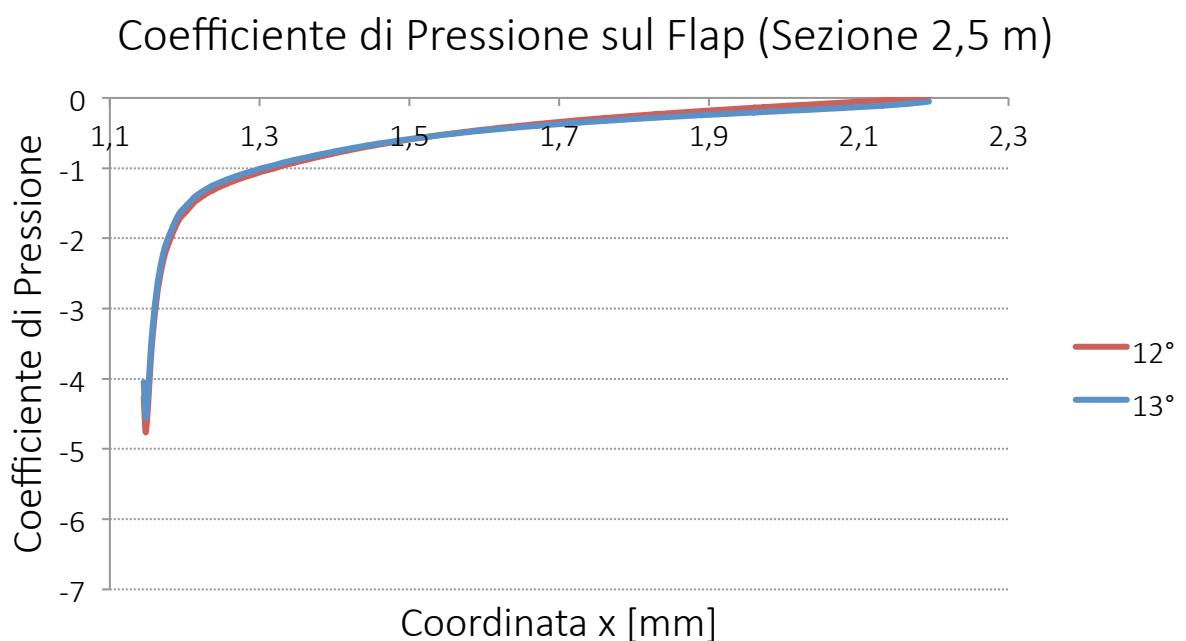


Fig. 6. 43

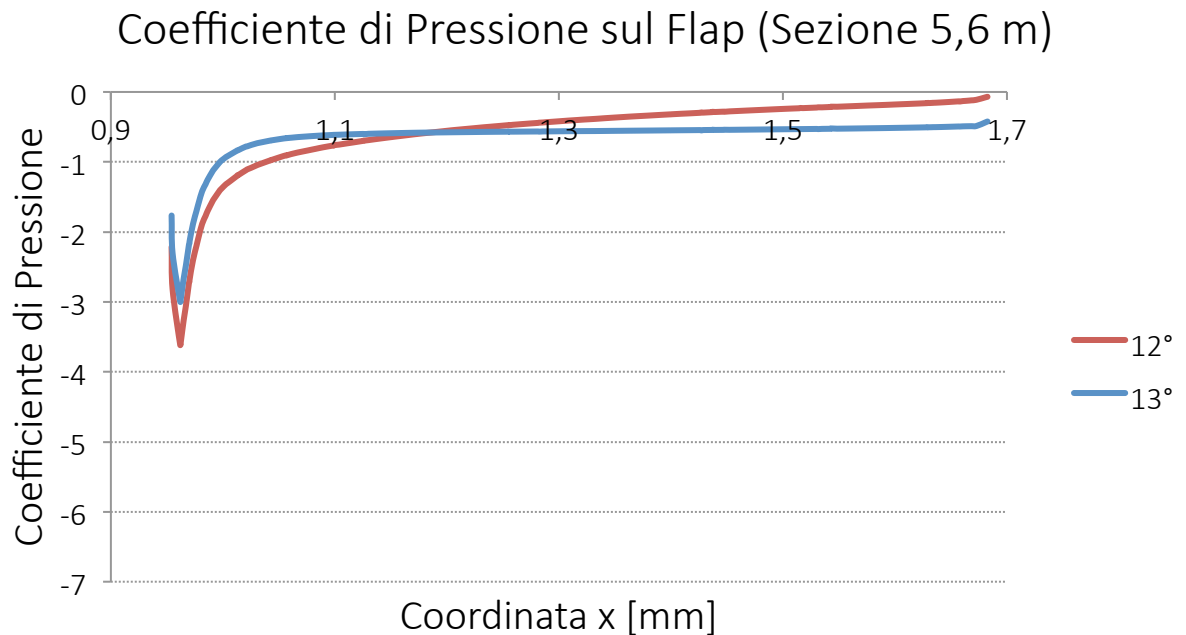


Fig. 6.44

Anche in questo caso, nella sezione a 2,5 metri dall'origine del sistema di riferimento gli effetti dello stallo sono pressoché trascurabili.

Nella sezione a 5,6 metri, invece, gli effetti sono certamente meno marcati rispetto al caso del *main*, in particolar modo in prossimità del bordo d'attacco; tuttavia, è comunque presente un appiattimento del coefficiente di pressione che, anche in questo caso, riesce a interessare una zona ampia del dorso.

Certamente, i valori limitati del picco di aspirazione rispetto al caso del *main* richiederanno diversi tipi di valutazione riguardo alla sensibilità dello strumento.

Sensibilità della misura al posizionamento

Come fatto in precedenza, l'analisi ha inizio ipotizzando di disporre due sensori a distanza di 10 cm uno dall'altro, e si studia, quindi, la sensibilità della misura effettuata alla posizione e alla mutua distanza, prendendo come riferimento anche questa volta la sezione più incline allo stallo, posta a 5,6 metri di altezza dall'origine del sistema di riferimento.

I grafici seguenti, di aiuto per la scelta, sono stati tracciati in maniera del tutto analoga ai precedenti, solo operando una diversa scalatura per facilitare la lettura. Nel primo di questi, in ascissa è rappresentata l'ascissa curvilinea (calcolata a partire dal bordo d'uscita) rispetto alla quale sono disposti in maniera equidistante i due sensori. Le relazioni che descrivono le due curve sono le seguenti:

$$y_{\text{RED}} = (1 - 2 \cdot \Delta c_p) \cdot 100 \quad y_{\text{GREEN}} = 5 \cdot \frac{\Delta c_p}{\Delta s} \cdot 10^4$$

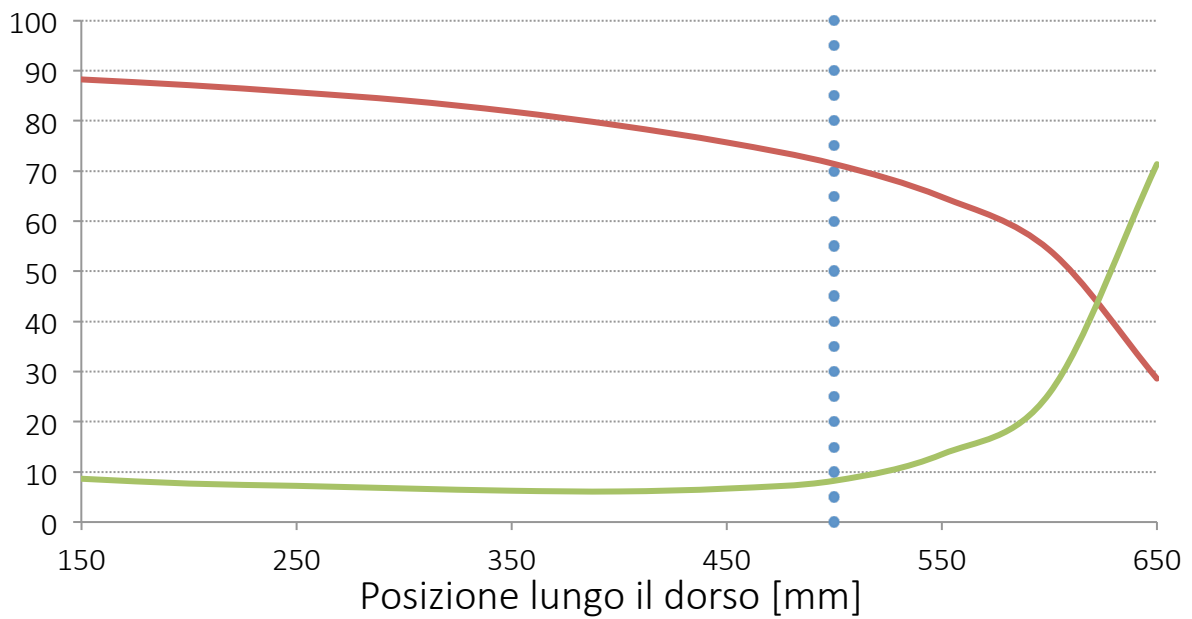


Fig. 6. 45

In modo analogo a quanto operato sul *main*, nella condizione di massima portanza precedente allo stallo si è cercata la massima differenza tra le letture che non pregiudichi una lettura del gradiente prossima allo zero in condizioni di flusso separato. Dati questi presupposti, una posizione del centro dei sensori a 50 cm di ascissa curvilinea dal bordo d'uscita può apparire un buon compromesso e, stabilita questa scelta, si può valutare l'effetto della distanza esistente tra i due sensori attraverso un ulteriore grafico che riporti tale parametro in ascissa.

Nel seguente grafico la curva rossa è governata dalla relazione seguente, la verde dalla precedente:

$$y_{\text{RED}} = \left(1 - \frac{\Delta c_p}{2}\right) \cdot 100$$

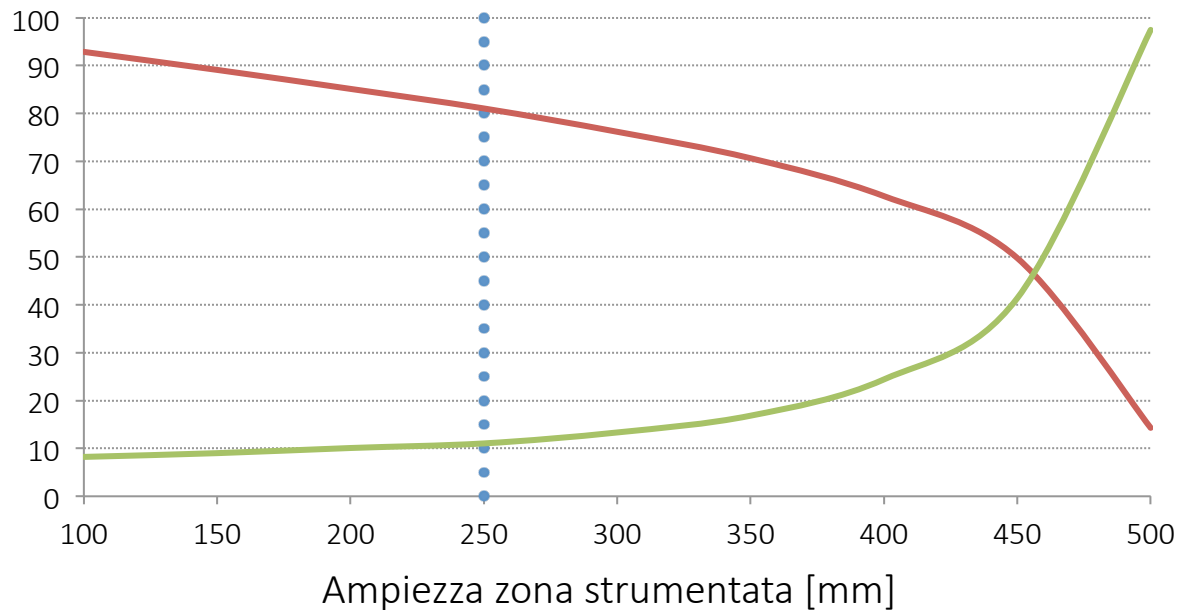


Fig. 6. 46

Se si osserva che la scalatura è la medesima utilizzata nel caso dell'analisi sul *main*, una distanza di 25 cm consentirebbe di soddisfare nella stessa misura del caso precedente il requisito sulla lettura di un gradiente quasi nullo, mentre la risoluzione richiesta ai sensori dovrà essere necessariamente maggiore.

Anche in questo caso, l'utilizzo di un numero di sensori maggiore non produce effetti benefici sulla misura, ma potrebbe rivelarsi utile per la definizione di un sistema di sensorizzazione maggiormente robusto.

Conclusioni

Un esempio dell'andamento del gradiente al variare dell'incidenza misurato con due sensori disposti a 37,5 cm e 62,5 cm di ascissa curvilinea dal bordo d'uscita è mostrato nel seguente grafico:

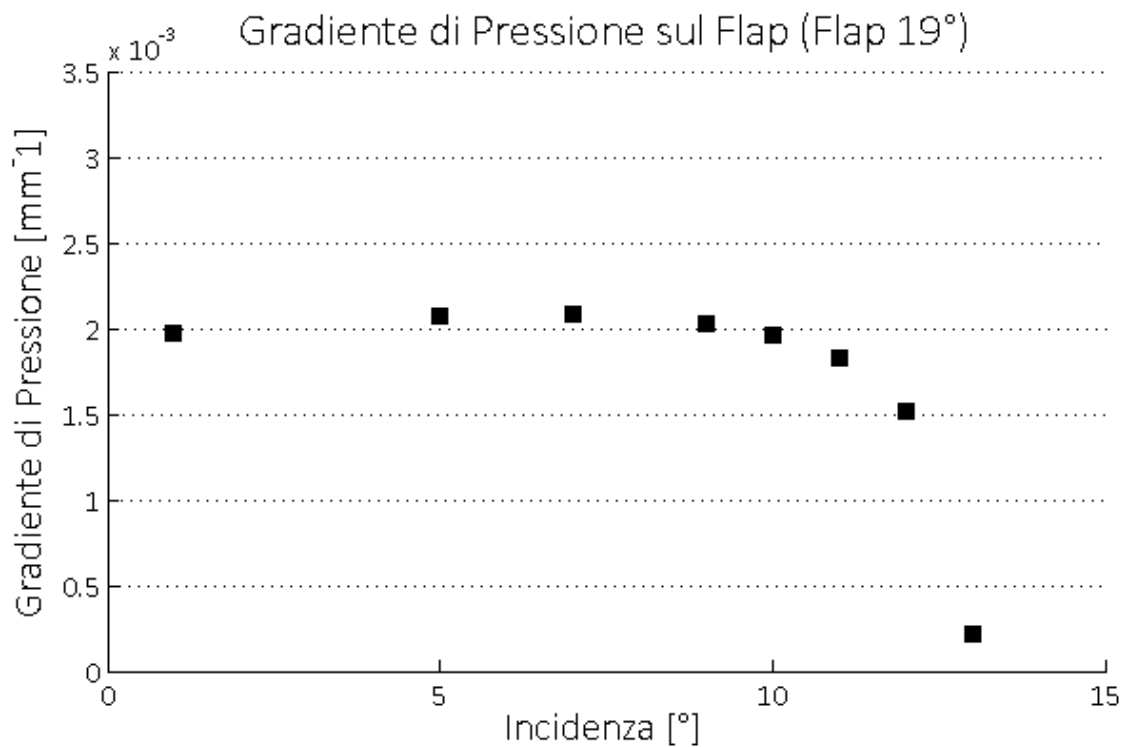


Fig. 6. 47

Si nota che dorso del *flap* il gradiente è contenuto già per valori di incidenza precedenti lo stallo, ragion per cui riveste un'importanza ancora più grande il fatto che il valore di gradiente successivo ad esso mostri uno scarto evidente e si avvicini allo zero.

Anche qui, la trattazione completa non può prescindere dalla valutazione di eventuali differenze nel fenomeno dello stallo al variare della deflessione del *flape* del numero di Reynolds.

A titolo d'esempio, si riporta l'andamento del coefficiente di pressione nella sezione di riferimento (5,6 metri dall'origine) a cavallo dello stallo per valori di deflessione del flap pari a 3° e 31°.

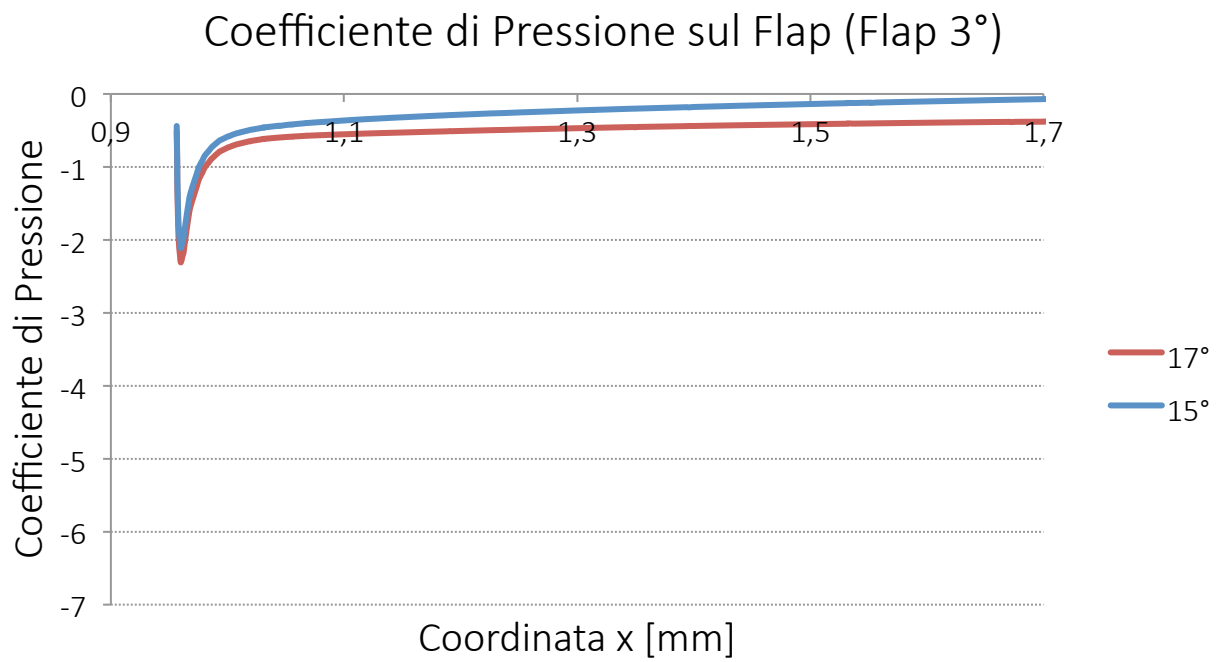


Fig. 6. 48

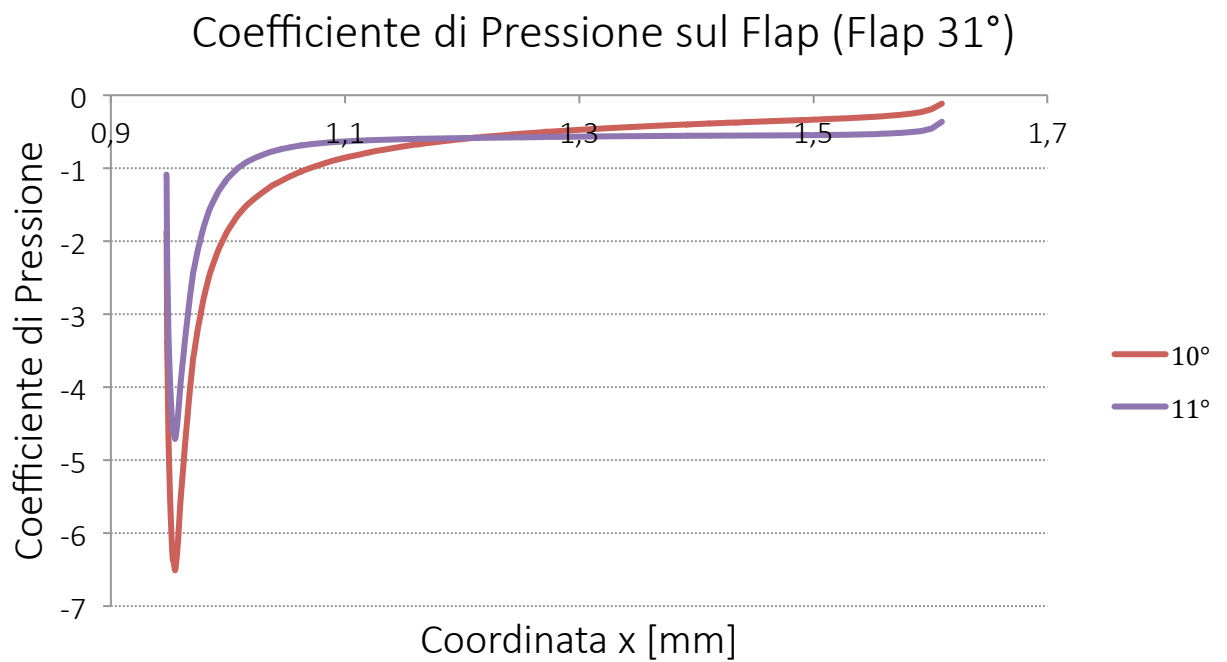


Fig. 6. 49

Si può notare come, per basse deflessioni, il *flap* non sembri risentire dello stallo e, anzi, il picco di aspirazione aumenti leggermente e il gradiente di pressione sul dorso cali solo leggermente, senza mostrare un andamento piatto e tendere ad azzerarsi. Difficilmente, quindi, la lettura dei coefficienti di pressione potrà fornire informazioni immediate.

Per quanto riguarda il caso di alta deflessione, invece, il comportamento appare assimilabile a quello riscontrato nel caso analizzato di 19° di deflessione del *flap*, con l'unica differenza nel valore più elevato del picco di aspirazione prima dello stallo, e del suo crollo più accentuato in seguito ad esso.

Questo tipo di strumentazione, comunque, potrebbe rivelarsi necessario per la determinazione della condizione di stallo di *flap*, nella quale il flusso sulla vela principale resta attaccato mentre sulla secondaria si ha una separazione diffusa. Il criterio per la sensorizzazione appena esposto resta comunque di validità generale, per quando per il caso in esame andrebbe rivalutato in una condizione da quella che è stata presa come riferimento nella trattazione.

6.5 Definizione della strumentazione della vela

In questo paragrafo conclusivo ci si occuperà di esporre, alla luce dell'elaborazione effettuata, un criterio per sensorizzare una vela rigida, con particolare attenzione alla sua applicazione nel caso analizzato.

Nella definizione si seguirà lo stesso schema utilizzato in tutto il capitolo, partendo dalla strumentazione del bordo d'attacco del *main*, in quanto riconosciuto come luogo maggiormente critico, per arrivare al bordo d'uscita del *flap* che, come si vedrà, potrebbe dare un contributo di minore impatto e criticità.

Bordo d'attacco del *main*

Nell'idea di essere in grado di definire, per una data combinazione di velocità del vento apparente e di andatura, l'assetto di ottimo per la navigazione in condizione di massima spinta vincolata dalla forza sbandante massima, lo scopo principale di una strumentazione della vela è quello di essere in grado di definire per ogni assetto richiesto la distribuzione dei punti di ristagno sui bordi di attacco di *main* e *flap* in modo da essere in grado di riprodurla.

Dal momento che gli errori commessi nella valutazione sono risultati minori sulla vela principale a causa principalmente delle dimensioni superiori appare ragionevole che la definizione della sensorizzazione di una vela rigida cominci proprio da questa zona.

Il primo *step* nel processo decisionale è quello di definire un valore di ottimo del passo tra i sensori dal momento che all'aumentare di questo l'errore commesso attraverso l'interpolazione quadratica come visto aumenta, ma diminuisce invece, a parità di risoluzione dello strumento, l'errore dovuto alla non corretta misura della pressione da parte del sensore.

Va ricordato a riguardo che è stata riscontrata una consistente dispersione dei risultati in termini di calcolo dell'errore commesso dovuto all'interpolazione al variare dell'incidenza, dovuto al fatto che questo dipende fortemente dalla posizione relativa tra il punto di ristagno vero e i sensori più prossimi. Per questo motivo può essere utile, se non necessario, disporre le strisce di sensori a coppie sfalsate di mezzo passo in ognuna delle postazioni che verranno

previste in apertura. Questo dà la possibilità di utilizzare come valore di riferimento l'errore medio commesso al variare del passo in luogo del massimo con un buon livello di confidenza.

In ogni caso sarà necessario definire una sezione di riferimento rispetto alla quale effettuare le valutazioni descritte, salvo poi osservare come varia il comportamento al variare della quota. In questo caso, come già visto nel corso della trattazione, la sezione di riferimento è posta nella parte inferiore della stessa, ad una altezza di 1,9 metri dalla sezione di base.

Inoltre, l'errore dovuto alla risoluzione varia a seconda dell'incidenza dal momento che varia la differenza tra due valori adiacenti della misura di pressione. Si è visto che anche questa influenza può essere mitigata tramite l'inserimento di più strisce di sensori sfalsate tra loro; in ogni caso si mostra in questo studio un esempio della procedura applicata all'assetto di 5° di incidenza e 19° di deflessione, con la consapevolezza che un'analisi completa dovrebbe riapplicare lo stesso metodo nelle diverse situazioni in cui si può trovare la vela.

L'idea è quella, una volta definita la precisione dello strumento espressa in percentuale della pressione dinamica, di andare a trovare l'errore massimo che può essere commesso tra tutte le possibilità di misurazione non corretta dello strumento e di riportarlo in un grafico assieme all'errore dovuto all'interpolazione, al quale dovrà essere sommato: infatti, la tipica asimmetria del gradiente in prossimità del punto di ristagno rende gli errori sempre concordi.

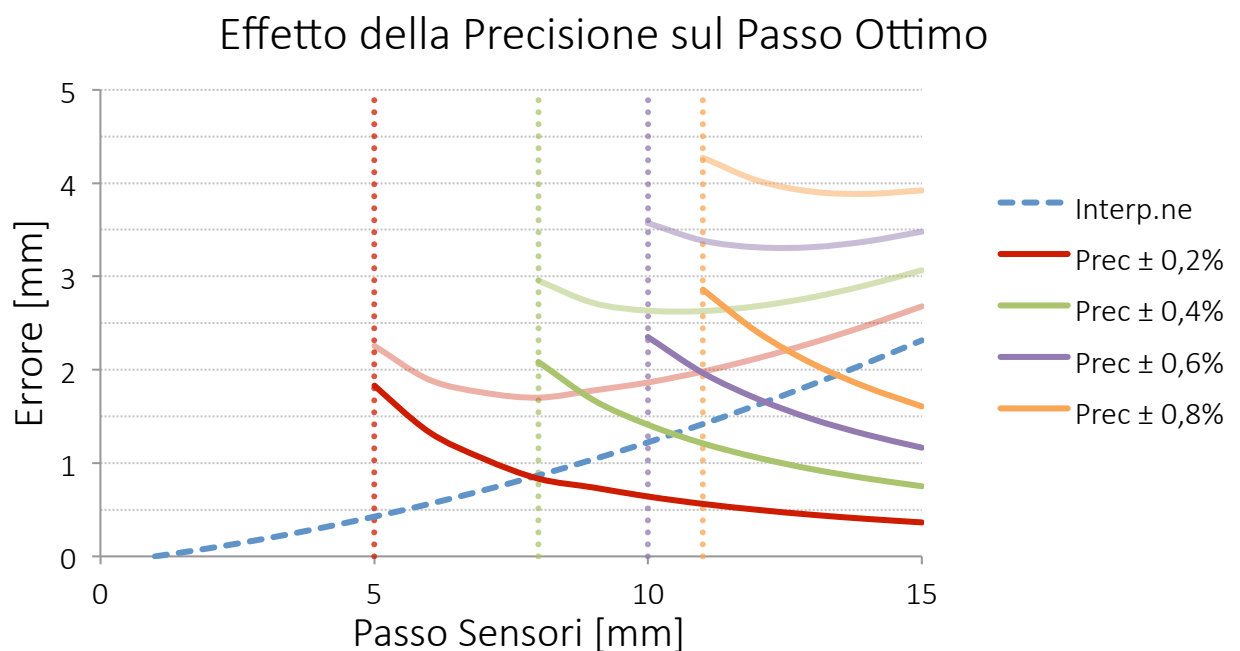


Fig. 6. 50

Per ogni classe di precisione è stato individuato un valore minimo di spaziatura tra i sensori, dovuto al requisito che il sensore misurante il massimo valore di pressione non si trovasse a fornire un valore inferiore a uno adiacente, portando l'interpolazione a venire eseguita tra tre sensori diversi da quelli “corretti”. Sono state anche riportate le curva esprimenti la somma dei due contributi di errore, che presentano un minimo in corrispondenza del passo ottimo. Inizialmente era stato assunto che per 1 cm di spaziatura dei sensori la sensibilità minima che andava richiesta fosse dello $0,6 \div 0,7\%$ della pressione dinamica e questo è effettivamente confermato dal grafico appena mostrato. Quello che si vede è però anche che il passo ottimo per questi valori della sensibilità si attesta intorno ai $12 \div 13$ mm.

Se il sensore deve operare in un range di velocità i requisiti di fondo scala (sul quale viene calcolata la classe di precisione) e di risoluzione sono definiti in due situazioni opposte: il primo per la velocità massima di funzionamento e il secondo nella minima. Per questo, se gli strumenti devono fornire prestazioni adeguate in un campo di velocità ad esempio compreso tra 5 e 10 m/s un trasduttore appartenente alla classe 0,2 di precisione (*Full Scale*) fornirà precisioni nella misura della pressione totale pari allo 0,8% della pressione dinamica alla minima velocità, essendo questa dipendente dal quadrato della velocità. Ottimizzando il caso in esame per la condizione di funzionamento peggiore si minimizza l'errore massimo commesso, che in questo caso assume il valore di circa 3,9 mm.

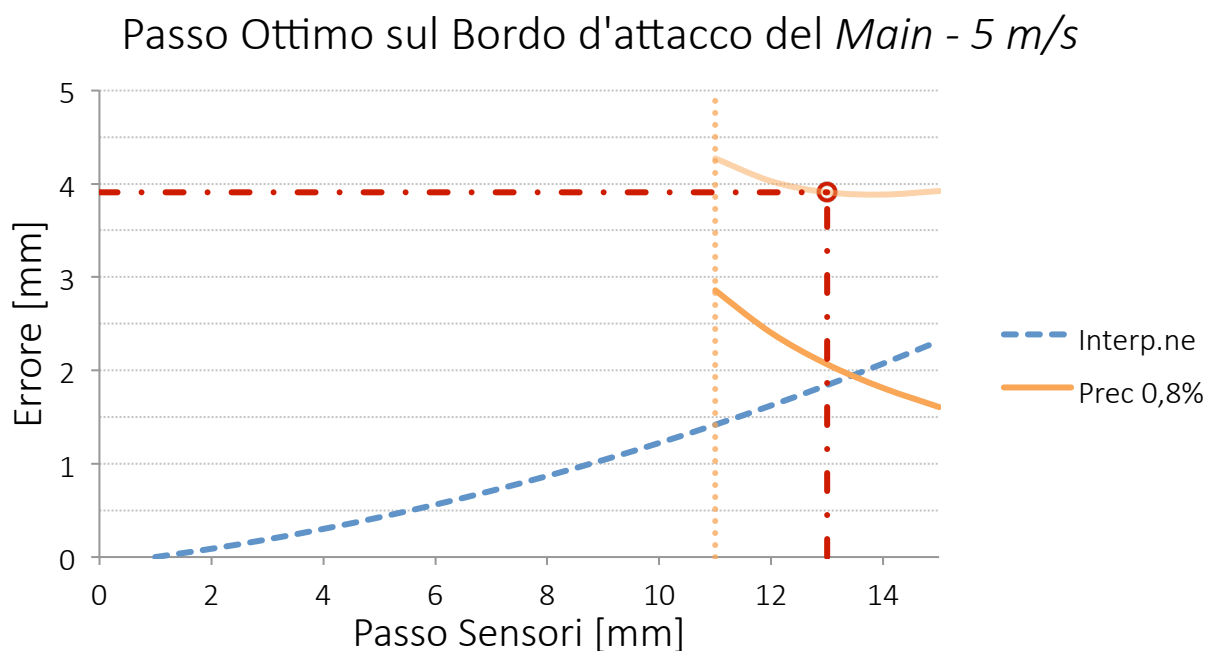


Fig. 6.51

Alle alte velocità la situazione sarà distante dall'ottimo, ma gli errori commessi comunque minori, visto che l'errore dell'interpolazione si mantiene inalterato, ma cala notevolmente la quota relativa alla precisione.

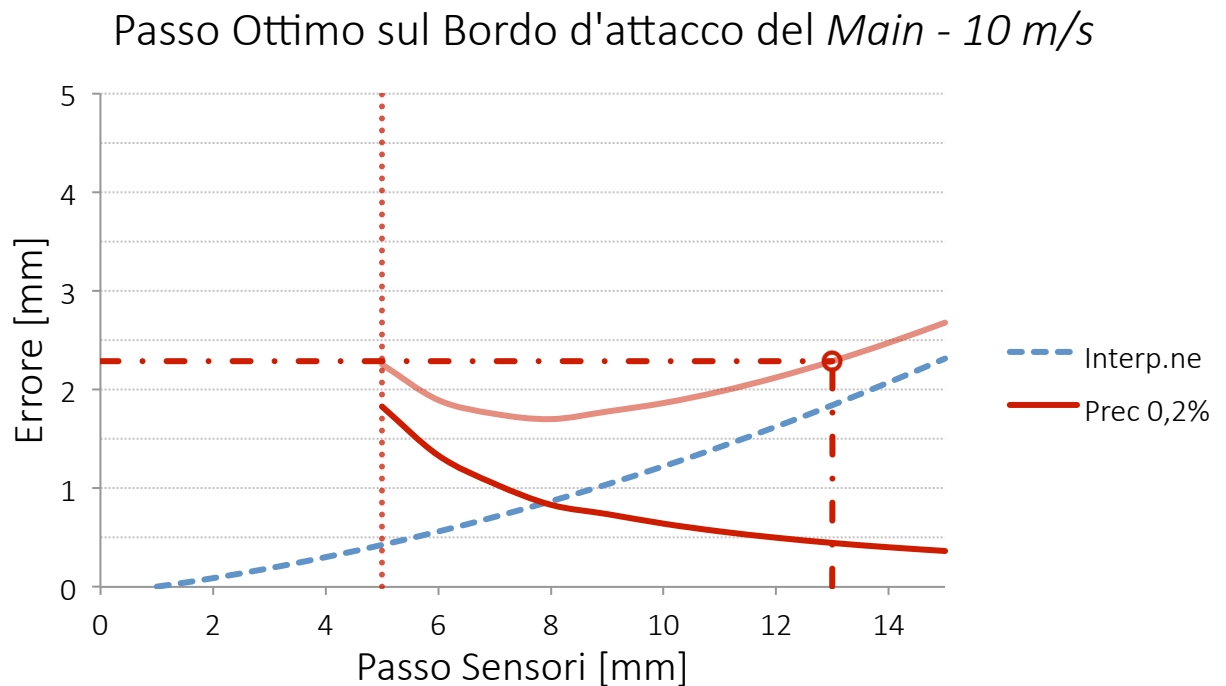


Fig. 6. 52

Spostandosi invece ad una quota più elevata le curve si modificano ed è possibile trarre graficamente le conclusioni su ciò che accade. In particolare si riporta il grafico per lo stesso assetto appena analizzato ad un'altezza di 5 metri dalla sezione di base della vela.

Supponendo di mantenere costante la spaziatura tra i sensori in apertura e di disporre di strumenti aventi medesima sensibilità, si osserva che l'errore assoluto commesso nella valutazione del punto di ristagno è di circa 3,3 mm: leggermente inferiore in termini assoluti benché, come visto in precedenza, porti a incertezze maggiori nel legame con l'incidenza.

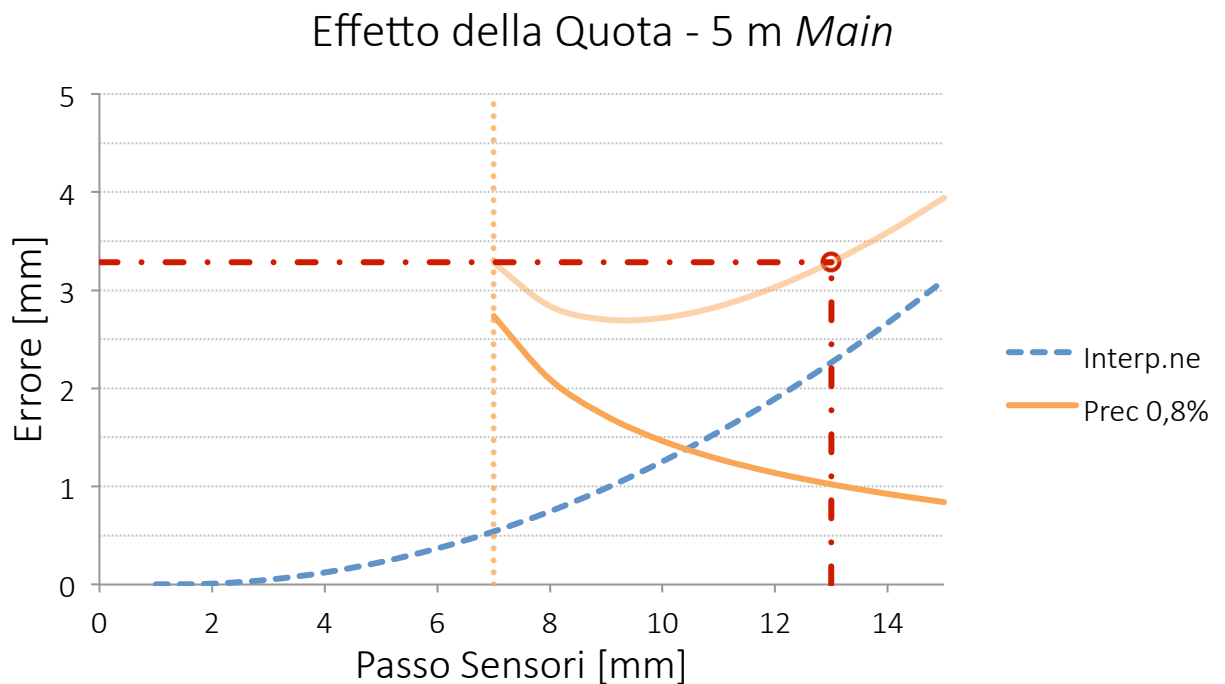


Fig. 6.53

Un'ultima precisazione riguarda il fatto che con l'aumentare della quota il passo minimo per una data sensibilità diminuisce, e questo porta nella pratica alla necessità di controllare che nella sezione più bassa che verrà strumentata questo sia minore o uguale a quello selezionato nella sezione di riferimento.

Per quanto riguarda l'errore nella misura della velocità ovviamente sarà necessario sommare l'errore percentuale dovuto alla spaziatura a quello dovuto alla precisione dello strumento e, soprattutto, a quello dovuto all'accuratezza del sensore. Disponendo di uno strumento dotato di un'accuratezza pari all'1% del fondo scala la quota di errore sulla misura della velocità ad essa connessa sarebbe al più del 2%.

La misura del valore del picco di aspirazione sul bordo d'attacco non riveste invece un problema di particolare criticità dal punto di vista dell'accuratezza dal momento che l'interesse è nella lettura della differenza tra due valori prima e dopo lo stallo. Per questo motivo, per quanto riguarda la precisione richiesta si cita a titolo di esempio che, anche nel caso di bassa deflessione, la diminuzione del picco in condizioni di separazione estesa è di circa 4 volte il valore della pressione dinamica. Considerando che il picco di aspirazione massimo raggiunto è

pari a circa -11, si tratta di una variazione di circa il 30% del fondo scala, sul quale una variazione anche dell'1% non comporterebbe grossi problemi.

Resta poi la difficoltà di un sensore che abbia contemporaneamente un fondo scala molto ampio in aspirazione e una sensibilità molto piccola in compressione, per cui sembra necessaria la scelta di sensori dedicati a lavorare solo in compressione da utilizzare per la misura del punto di ristagno e della velocità, e di strumenti differenti qualora si desiderasse misurare il picco di aspirazione. Si ricorda in ogni caso a riguardo che l'utilizzo di quest'ultima informazione si può rivelare utile solo se in possesso di un sistema di monitoraggio in tempo reale del sistema di attuazione oltre che delle misure della pressione.

Si riepilogano i requisiti richiesti ai sensori di pressione e gli errori stimati in questo caso:

Dimensione Massima		13 mm		
Vel. Min		5 m/s		
Vel. Max		10 m/s		
	Range [Pa]	Precisione [% FS]	Risoluzione [Pa]	Accuratezza [% FS]
compressione	0 ÷ 62	0,2	0,24	1
aspirazione	-680 ÷ 0	1	13,6	1

Tab. 6. 13

A questo punto si pone quindi il problema relativo al numero e alla posizione delle postazioni da ricavare nell'apertura della vela.

Per quanto riguarda i sensori che misurano il picco di aspirazione, dal momento che il loro utilizzo è pensato in correlazione al fenomeno dello stallo, la loro disposizione ottimale dovrebbe essere nelle zone dove il flusso separa. In particolare si è visto che per tutti i casi di stallo del *main* che sono stati esaminati, la separazione interessava la parte superiore della vela mentre non si riscontravano indicazioni facilmente utilizzabili nella sezione più bassa. Per quanto riguarda invece la misura della posizione del punto di ristagno, va messo in conto che nel caso reale il profilo di velocità dovuto allo strato limite terrestre causa una disuniformità dell'incidenza lungo la vela, e questo richiede necessariamente la misura di questa posizione in una serie di punti sufficiente ad ottenere un andamento della posizione del punto di ristagno in apertura univoco. Sarebbe necessaria un'analisi completa per poter definire un criterio oggettivo ma è ragionevole che una serie di 7 postazioni lungo la vela possa essere un numero sufficiente.

Si riporta un esempio delle sezioni che potrebbero essere strumentate nel caso della sezione in esame; l'altezza è presa a partire dalla sezione di base.

<i>Sezione [m]</i>
0,95
1,9
2,85
3,8
4,4
5
5,6

Tab. 6. 14

In tutte le postazioni quindi è necessario prevedere la disposizione di due strisce di sensori con passo di 1 cm sfalsate tra loro. Nelle sezioni a 4,4 e a 5 metri di altezza inoltre si può valutare l'opportunità di aggiungere una striscia di sensori destinati alla misura del picco di aspirazione.

L'ampiezza della zona da strumentare in ogni sezione si definisce in base alla posizione più arretrata assunta dal punto di ristagno in un assetto di massima deflessione del *flap*. Per 31° di deflessione si è visto in precedenza come il punto di ristagno si trovi al massimo in una posizione posta a circa 11,2 cm di ascissa curvilinea dal bordo d'attacco nella sezione strumentata a 1,9 metri dalla base e a circa 8,6 cm nella sezione a 5 metri.

Sarebbe a rigore necessario compiere lo stesso tipo di analisi in tutte le sezioni strumentate, ma ipotizzando un andamento lineare della posizione estrema del punto di ristagno è possibile riepilogare il numero di sensori che deve comporre ogni striscia alle varie altezze.

Sezione [m]	Numero Sensori
0,95	25
1,9	25
2,85	23
3,8	21
4,4	21
5	19
5,6	19

Tab. 6. 15

A questo punto può considerarsi conclusa la definizione della strumentazione del bordo d'attacco del *main*.

Bordo d'attacco del *flap*

La possibilità di misurare la posizione del punto di ristagno sul *flap* permette di utilizzare un doppio controllo sull'assetto ottimo definito in fase di analisi tramite la riproduzione durante la navigazione contemporaneamente della distribuzione ottima dei punti di ristagno sulle due vele. Inoltre, può ovviamente essere misurata anche in questo caso la pressione dinamica dalla quale ricavare la velocità, come ridondanza sui valori misurati sul *main*.

Per quanto riguarda infine la misura del picco di aspirazione, si è visto che nello stallo di *flap* a 35° di deflessione appare una vasta zona di separazione nella parte inferiore della vela, per cui è possibile andare a strumentare quella zona in maniera analoga a quanto visto per il *main*.

Valgono tutte le considerazioni fatte nel paragrafo precedente, per cui per brevità saranno richiamati i risultati ottenuti nel caso del *flap* senza ripetere la trattazione.

Per quanto riguarda la definizione del passo ottimo è stata presa in considerazione la stessa sezione di riferimento e la medesima configurazione di assetto. Anche gli strumenti inoltre sono stati considerati identici.

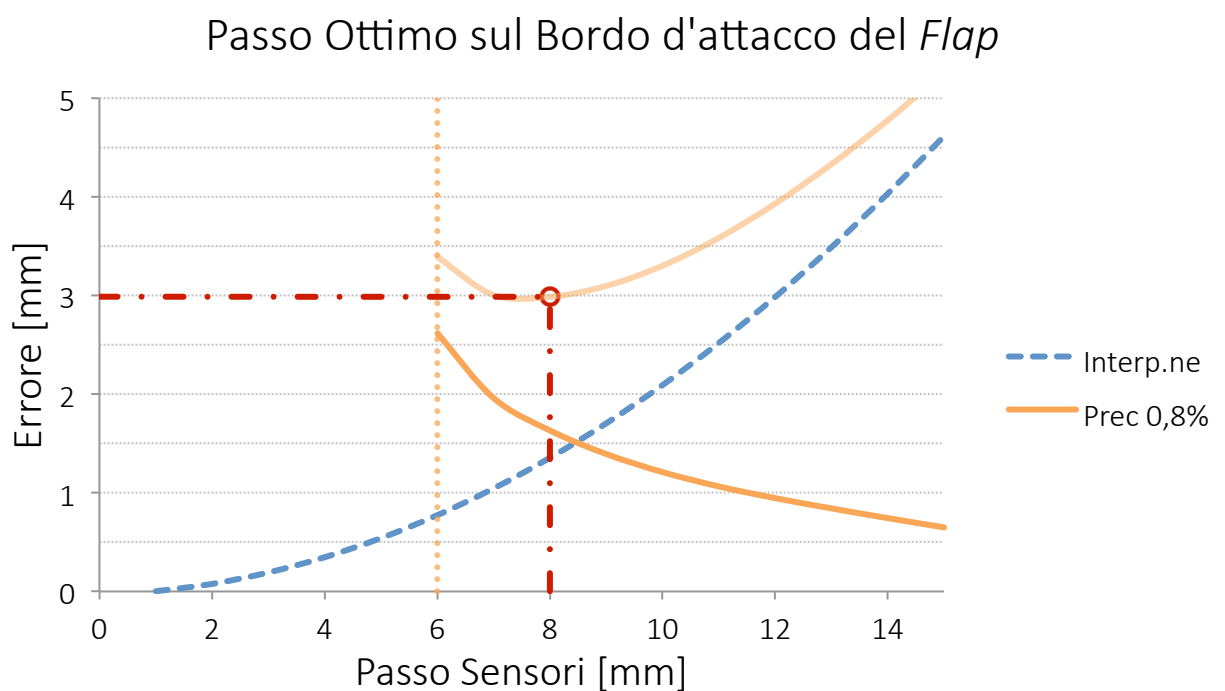


Fig. 6. 54

In questo caso il passo ottimizzato per la condizione di minima velocità si è rivelato essere pari a 8 mm, in corrispondenza dei quali l'errore sulla determinazione del punto di ristagno è pari a circa 3 mm.

Spostandosi nella sezione posta nella parte superiore si ipotizza anche in questo caso di mantenere costante la spaziatura tra i sensori. Il risultato è riportato nel grafico seguente.

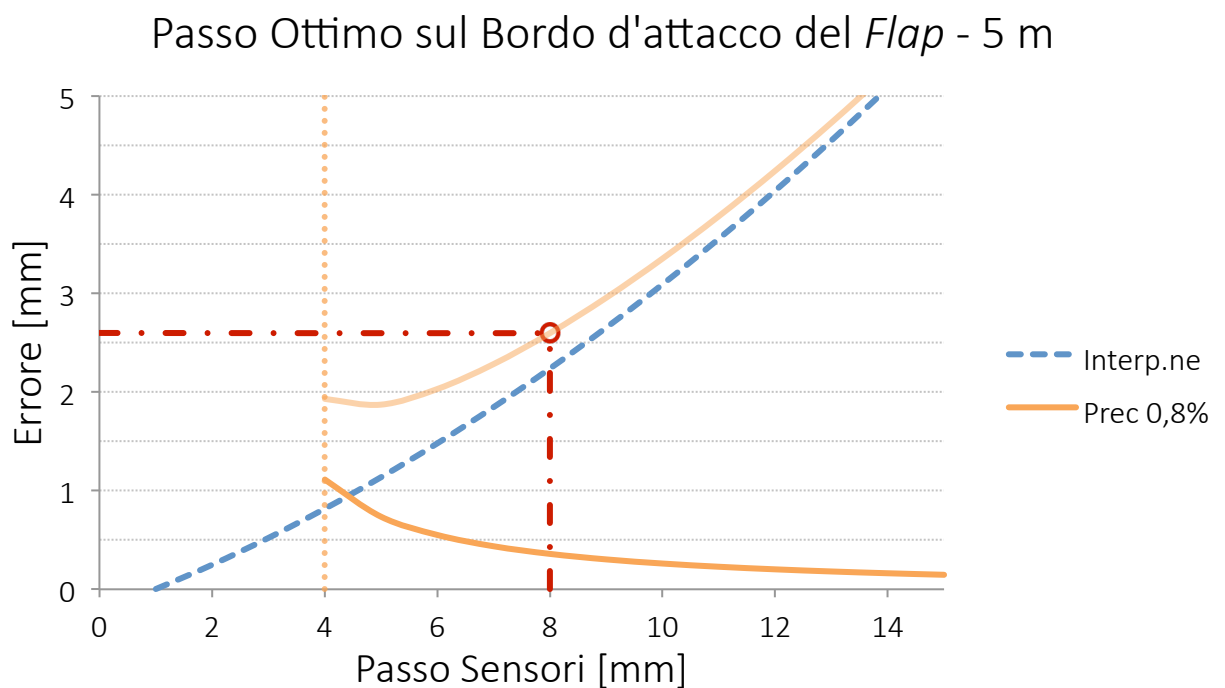


Fig. 6. 55

L'errore assoluto totale risulta pari a 2,6 mm che però si tradurranno certamente in una maggiore incertezza nella valutazione della corrispondenza con un determinato angolo di deflessione.

I requisiti per i sensori sono gli stessi visti per quelli di bordo d'attacco (il picco di aspirazione massimo è paragonabile), eccezion fatta per la dimensione massima, che è limitata dal valore del passo, a meno di utilizzare le strisce sfalsate e combinare le letture.

Dimensione Massima		6 mm			
Vel. Min		5 m/s			
Vel. Max		10 m/s			
	Range [Pa]	Precisione [% FS]	Risoluzione [Pa]	Accuratezza [% FS]	
<i>compressione</i>	0 ÷ 62	0,2	0,24	1	
<i>aspirazione</i>	-680 ÷ 0	1	13,6	1	
	Errore P.to di Ristagno [mm]	Incertezza Incidenza [°]	Errore Velocità [%]	Errore Picco di Aspirazione [%]	
5 m/s	5 m	2,6	2,4	4,0	9,5
	1,9 m	3,0	2,1	3,2	9,5
10 m/s	5 m	2,3	2,1	1,9	3,5
	1,9 m	1,7	1,2	1,1	3,5

Tab. 6. 16

Le postazioni da ricavare in apertura possono essere le stesse definite per la vela principale, e la sensorizzazione differisce essenzialmente perché i sensori che leggono l'aspirazione verranno in questo caso posizionati alle quote di 1,9 m e 2,85 m dal momento che lo stallo di *flap* avviene nella parte inferiore della vela, al contrario di quello di *main*.

Anche per l'ampiezza della zona da strumentare valgono le considerazioni fatte nel sottoparagrafo precedente. Per 31° di deflessione si è visto come il punto di ristagno si trovi al massimo in una posizione posta a circa 4,4 cm di ascissa curvilinea dal bordo d'attacco nella sezione a 1,9 metri dalla base e a circa 2,7 cm nella sezione a 5 metri.

Anche in questo caso una stima del numero di sensori da disporri in ogni sezione può essere fatta considerando un andamento lineare della posizione del punto di ristagno con la quota.

Sezione [m]	Numero Sensori
0,95	19
1,9	17
2,85	15
3,8	13
4,4	13
5	11
5,6	9

Tab. 6. 17

Bordo d'uscita del *main*

Per quanto riguarda la strumentazione del bordo d'uscita del *main* si è visto come questa possa essere di aiuto nella valutazione dello stallò ma appaia di molta minore criticità rispetto a quella vista fino ad ora, dal momento che la zona interessata è molto più ampia e gli effetti molto più evidenti.

Il lavoro di definizione del posizionamento dei sensori nella sezione di riferimento, che in questo caso è stata quella posta a 5 metri dalla sezione di base, è stato già effettuato nel corso del capitolo, e a questo punto non resta che concentrarsi sulla definizione dei requisiti che devono avere i sensori di pressione e sulla distribuzione degli stessi sull'apertura della vela.

Si comincia innanzitutto dalla definizione del fondo scala che deve avere il sensore. Nella sezione di riferimento analizzata ponendo uno dei sensori a 60 cm di ascissa curvilinea dal bordo d'uscita questo misura prima dello stallò una pressione pari a circa il 25% del picco di

aspirazione. Si è poi visto che questo lo stesso posizionamento appare adeguato anche nel caso di deflessione del *flap* di 31° e anche in questo caso la pressione misurata in quel punto è pari alla stessa percentuale del picco di aspirazione, che in questo assetto è leggermente aumentato. Quindi è possibile definire un fondo scala pari a circa un quarto di quello definito per i sensori dedicati alla misura del picco di aspirazione sul bordo d'attacco del *main*. Per quanto riguarda la precisione da assegnare ai sensori, invece, questa è connessa alla differenza tra le pressioni misurate dai due sensori posti a 20 e a 60 cm dal bordo d'uscita ed è minima nel caso di minima deflessione del *flap*, per quanto questo valore potrebbe risultare di fatto scarsamente utile per la navigazione.

In ogni caso, per 3° di deflessione la differenza misurata è pari a circa 0,9 volte la pressione dinamica. Se si dispone di strumenti di misura con precisione analoga a quella dei sensori visti per il bordo d'attacco questi sarebbero certamente adeguati allo scopo e permetterebbero di non discostarsi troppo dal comportamento analizzato in fase di scelta del posizionamento dei sensori di estremità.

Si riepilogano perciò a questo punto le caratteristiche degli strumenti necessari:

Vel. Min 5 m/s

Vel. Max 10 m/s

	Range [Pa]	Precisione [% FS]	Risoluzione [Pa]	Accuratezza [% FS]
<i>aspirazione</i>	-170 ÷ 0	1	3,4	1

Tab. 6. 18

Per quanto riguarda le sezioni da strumentare, vale lo stesso discorso proposto nella scelta delle stazioni in corrispondenza delle quali disporre i sensori misuranti l'aspirazione al bordo d'attacco.

Si sceglie quindi di strumentare sicuramente le sezioni a 4,4 metri e 5 metri da quella di base, mirando a realizzare un'eventuale ridondanza richiesta tramite la disposizione di ulteriori sensori tra i due estremi, che come visto non inficiano la misura effettuata.

Dal momento che le due sezioni sono piuttosto vicine tra loro è ragionevole che una spaziatura analoga a quella vista per la sezione a 5 metri funzioni bene anche a 4,4 metri. In ogni caso, per una trattazione maggiormente esaustiva andrebbe ripetuta l'analisi in maniera perfettamente analoga a quanto visto nel caso di riferimento.

Bordo d'uscita del *flap*

Il bordo d'uscita del *flap* può essere sensorizzato come visto in maniera del tutto analoga a quello della vela principale, in modo da essere in grado di riconoscere l'eventuale separazione del flusso sul suo dorso in corrispondenza di deflessioni eccessivamente elevate, al posto o in aggiunta alla misura del picco di aspirazione sul bordo d'attacco.

Anche in questa zona il lavoro di definizione del posizionamento è stato già visto per un particolare assetto della vela, ma per una sensorizzazione maggiormente efficace andrebbe certamente rivisto in una condizione nella quale il flusso separi sul *flap*, nonché in una sezione di riferimento posta nella metà inferiore della vela dove, a causa della diversa forma del bordo d'attacco, le aspirazioni sono più elevate. In ogni caso, i criteri da seguire possono essere gli stessi definiti nei paragrafi precedenti.

Per quanto riguarda la definizione del fondo scala e della risoluzione necessaria andrebbero prima definiti i punti di misura in una sezione maggiormente significativa ma, visto che il picco massimo sul *flap* è comparabile con quello riscontrato sul *main*, è ragionevole pensare che sensori analoghi a quelli definiti precedentemente siano adeguati a questa applicazione.

Si richiamano di seguito perciò le loro caratteristiche principali:

Vel. Min 5 m/s

Vel. Max 10 m/s

	Range [Pa]	Precisione [% FS]	Risoluzione [Pa]	Accuratezza [% FS]
<i>aspirazione</i>	-170 ÷ 0	1	3,4	1

Tab. 6. 19

Per quanto lo scopo principale della sensorizzazione del bordo d'uscita nel caso del *flap* sia quello di dare una misura atta a non eccedere il valore massimo di deflessione utilizzabile, si è visto che anche nel caso di stallo con separazione estesa sul *main* questa incide sulla distribuzione di pressione sul *flap*, per quanto i risultati ottenibili siano meno evidenti. Inoltre, nel caso di stallo “di bassa deflessione” era possibile notare delle zone in prossimità del bordo d'uscita del *flap* nelle quali il flusso separa allo stallo. Nella scelta delle postazioni da strumentare in apertura si può perciò pensare di selezionare, oltre alle postazioni nella parte inferiore nelle quali si misura viene misurato il picco di aspirazione (1,9 m e 2,85 m) anche quelle nelle quali può essere valutata la presenza della porzione separata verso il bordo d'uscita nei casi di stallo di bassa deflessione (3,8 m e 4,4 m).

Una scelta ottimale, inoltre, prevedrebbe di valutare un'ottimizzazione della disposizione dei sensori diversa a seconda del diverso utilizzo che avrebbero nella parte inferiore e in quella superiore, ripetendo ancora una volta le stesse valutazioni viste nei precedenti paragrafi, che possono essere considerate come linee guida generali.

Capitolo 7

Applicazione alla Navigazione

Definito il criterio di sensorizzazione nei suoi diversi aspetti, per usufruire della strumentazione della vela in navigazione è necessario definire l'assetto di ottimo cui essa deve riferirsi. Pertanto, è necessario definire i criteri con cui è stabilita la regolazione di ottimo della vela.

7.1 Equilibrio e stabilità

Vento apparente e andature

In navigazione la barca è investita dal *vento apparente*, somma vettoriale di vento reale e opposto della velocità dell'imbarcazione. Quello che interessa le vele, infatti, è il flusso incidente nel sistema di riferimento dell'imbarcazione, responsabile della generazione delle forze aerodinamiche che costituiscono il sistema propulsivo dell'imbarcazione e sono trasmesse allo scafo tramite l'albero, lo strallo e le sartie.

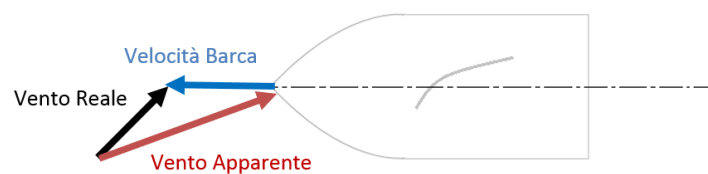


Fig. 7. 1

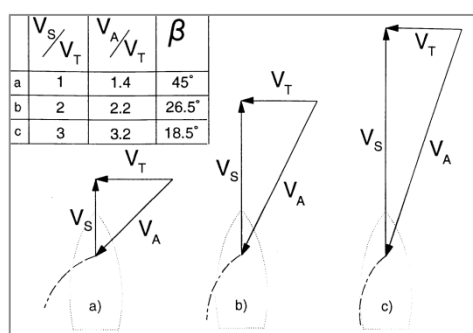


Fig. 7. 2

La natura delle forze aerodinamiche che le vele sono in grado di generare dipende in maniera essenziale dall'intensità del vento che investe le vele e dall'angolo β_A tra il vento apparente e la direzione di avanzamento della barca.

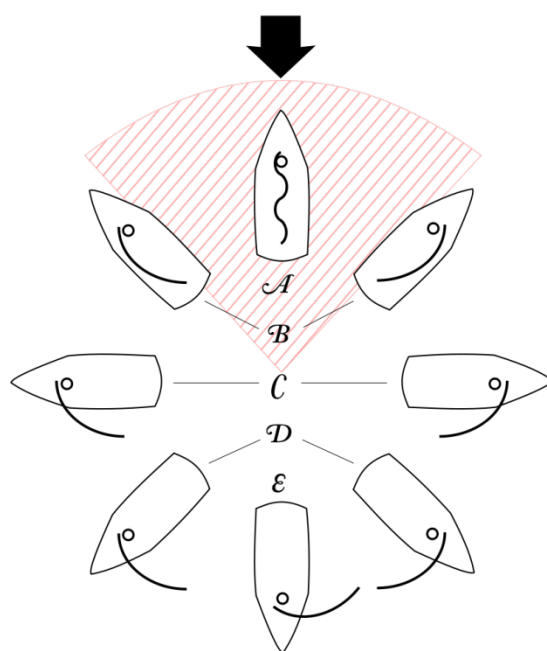


Fig. 7. 3

Le *andature portanti* sono caratterizzate da un angolo β_A tale da garantire un'andatura a favore di vento. Si possono dunque includere in questa categoria le andature di *Lasco*, *Gran lasco* e *Poppa* (D, E). A livello aerodinamico, queste andature utilizzano come forza propulsiva la resistenza al vento offerta dalla vela, meccanismo di funzionamento analogo a quello del paracadute:

$$T = D = \frac{1}{2} \rho S C_D V_{AW}^2$$

Le *andature montanti* sono caratterizzate da un angolo β_A non superiore a 90° . Si possono includere in questa categoria le andature di *Bolina stretta*, *Bolina larga* e *Traverso* (A, B, C). In queste andature le vele permettono all'imbarcazione di procedere controvento grazie al meccanismo di formazione delle forze aerodinamiche analogo a quello dell'ala di un velivolo: nell'andatura di bolina la vela avrà un comportamento simile a quello di un'ala posta a bassa incidenza.

Esiste un intorno della direzione del vento apparente, chiamato *angolo morto*, in cui la barca non può avanzare con alcuna regolazione delle vele; il valore di tale angolo varia da un'imbarcazione all'altra.

Le forze aerodinamiche

Integrando le pressioni agenti sull'intera superficie della vela si ottiene la forza aerodinamica totale F_T , che può essere scomposta lungo il *sistema assi vento apparente* in portanza L e resistenza D oppure lungo il *sistema assi corpo* in spinta T , parallela alla velocità della barca, e forza laterale F_L , perpendicolare ad essa.

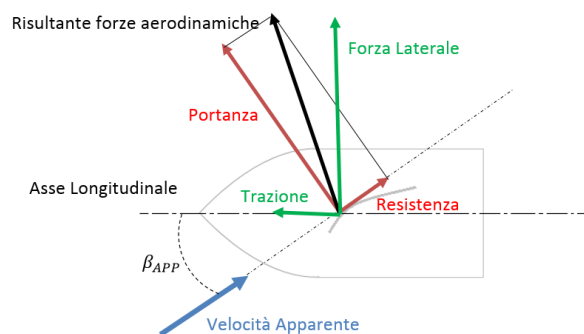


Fig. 7. 4

Vi è una stretta correlazione tra la velocità della barca, e dunque il tempo per miglio nautico, e la spinta generata dalle vele. L'obiettivo della vela è quello di fornire un'alta forza propulsiva T , inevitabilmente legata alla generazione di una forza laterale di sbandamento. Infatti, alla *driving force* nella direzione di moto è sempre associata una *side force* indesiderata ad essa ortogonale. L'intensità relativa delle due azioni varia notevolmente con la regolazione delle vele e l'angolo con il vento apparente.

Le forze idrodinamiche

La nascita delle forze idrodinamiche è dovuta al moto relativo tra l'imbarcazione e l'acqua; le superfici immerse sono investite da un flusso opposto alla velocità di avanzamento della barca e generano, quindi, forze di portanza e di resistenza essenziali per l'equilibrio della barca. L'imbarcazione non naviga perfettamente allineata al suo asse longitudinale; infatti essa acquisisce una componente di moto nella direzione ortogonale, avanzando quindi lungo una direzione inclinata di un angolo ε rispetto all'asse poppa-prua. Il fenomeno è identificato come *scarroccio*. Le forze idrodinamiche sullo scafo che equilibrano la spinta laterale sulle vele sono generate essenzialmente dalla deriva, posta a incidenza rispetto alla direzione del moto a causa dall'*angolo di scarroccio* ε .

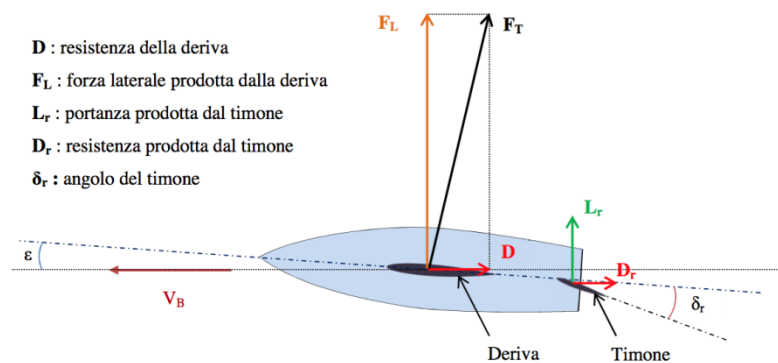


Fig. 7. 5

Il controllo dell'imbarcazione è garantito dal timone (*rudder*), per mezzo della generazione di una forza di portanza addizionale L_r capace di produrre un momento imbardante.

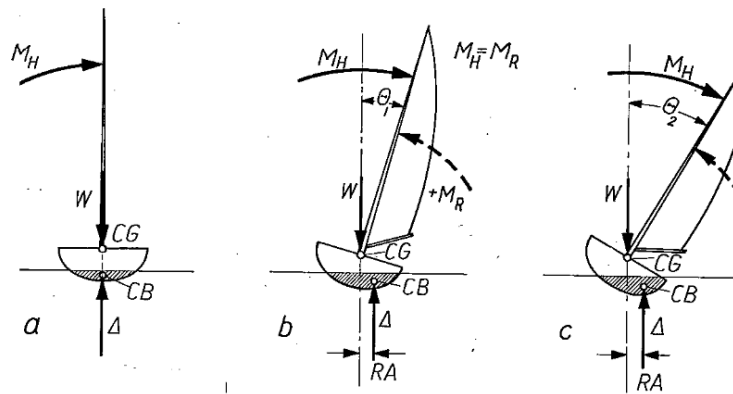


Fig. 7. 6

Nel piano verticale si ha equilibrio verticale tra forza peso dell'imbarcazione W e spinta idrostatica di Archimede S_H . A causa del disallineamento verticale (braccio) tra $F_{L\text{vele}}$ e $F_{L\text{deriva}}$, si produce un momento sbandante di rollio M_H , che deve essere equilibrato dal momento raddrizzante M_R di richiamo dello scafo prodotto dal disallineamento tra W e S_H . Per produrre questo momento è necessario che la barca veleggi con un adeguato angolo di sbandamento (*heelangle*) θ . Infatti, la spinta idrostatica agisce sul *centro di carena*, centro dei volumi immersi, che si discosta orizzontalmente dal *baricentro* tanto più aumenta l'angolo di sbandamento θ . In altri casi, la stabilità può essere affidata all'equipaggio che, spostandosi fuoribordo, aumenta il braccio della coppia raddrizzante.

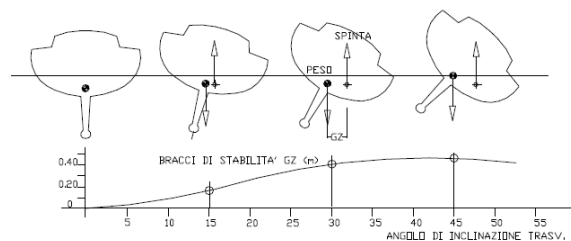


Fig. 7. 7

Il momento raddrizzante M_R è il prodotto tra dislocamento Δ e il braccio di raddrizzamento RA . Esistono due tipi di approccio alla stabilità, uno tipicamente europeo basato sul concetto di *stabilità di peso*, uno più “esotico” basato sulla *stabilità di forma* e la zavorra mobile, più diffuso nelle Indie Occidentali, nel Pacifico e in Australia. Dato un certo dislocamento, è possibile aumentare la stabilità incrementando il braccio di raddrizzamento, e ciò può essere ottenuto abbassando il più possibile il baricentro (*stabilità di peso*), oppure spostando lateralmente la posizione del centro di carena (*stabilità di forma*). La stabilità di peso è propria delle

imbarcazioni monoscafo nelle quali il peso del bulbo, posto sotto la deriva, ha la funzione di zavorra ed è atto ad abbassare il più possibile il baricentro della barca. Per la stabilità di forma, si noti che le carene capaci di garantire un rimarchevole spostamento laterale del centro di carena con piccoli angoli di sbandamento sono caratterizzate da bassi rapporti di snellezza, che si traducono in elevata resistenza. Il problema viene risolto dai multiscafi, che hanno grande stabilità di forma senza dare un penalizzante aumento di resistenza.

Oltre alla resistenza prodotta dalla deriva e dal timone, nel computo delle forze idrodinamiche va inclusa la resistenza dovuta allo scafo, che può essere suddivisa in: *resistenza di attrito* (direttamente proporzionale alla superficie bagnata e all'evoluzione dello strato limite, che conviene rimanga *laminare* più a lungo possibile), *resistenza di pressione* (dipendente dalla percentuale di separazione dello strato limite), e *resistenza d'onda* (dipendente dal treno d'onde prodotto dalle perturbazioni di pressione sul pelo libero dell'acqua).

7.2 Introduzione allo studio delle prestazioni della vela

Limitazione della forza laterale

Come si è visto, il limite massimo della forza laterale ammissibile è dato dalla possibilità di equilibrare il momento di rollio generato, la cui entità dipende anche dal punto di applicazione delle forze aerodinamiche e in particolare dalla sua distanza dal centro di rotazione.

Grazie alle simulazioni CFD è stato possibile stimare questo parametro, individuato approssimativamente in corrispondenza del 45% dell'apertura. Nel caso di Cherubina, lo sbandamento viene contrastato essenzialmente in modo attivo, sporgendosi esternamente allo scafo dal lato opposto a quello della forza laterale grazie all'utilizzo del trapezio. In questo modo è possibile aumentare il braccio della forza peso dei componenti dell'equipaggio, massimizzando la possibilità di contrasto dello sbandamento.

Considerando un peso dell'equipaggio pari a 150 kg, una distanza massima del suo baricentro dall'asse della barca di 2 metri e una posizione del centro di rotazione 10 cm sotto al livello del mare, si trova che il coefficiente di forza laterale generato dalla vela in esame non può superare, nel caso di velocità del vento apparente di 10 m/s, il seguente valore:

$$C_{lat} = \frac{150 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2 \text{ m}}{\frac{1}{2} \cdot 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 100 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \cdot 12 \text{ m}^2 \cdot 3,5 \text{ m}} = 1,13$$

Di seguito si mostra graficamente l'applicazione di questo limite a un caso in cui l'*angolo al vento apparente* (combinazione di *angolo di scotta* e *incidenza*) è pari a 10° con la *wingsail* posta in un assetto avente 19° di deflessione del *flap*.

Limite sulla Forza Sbandante (Angolo al Vento Apparente 10° , Flap 19°)

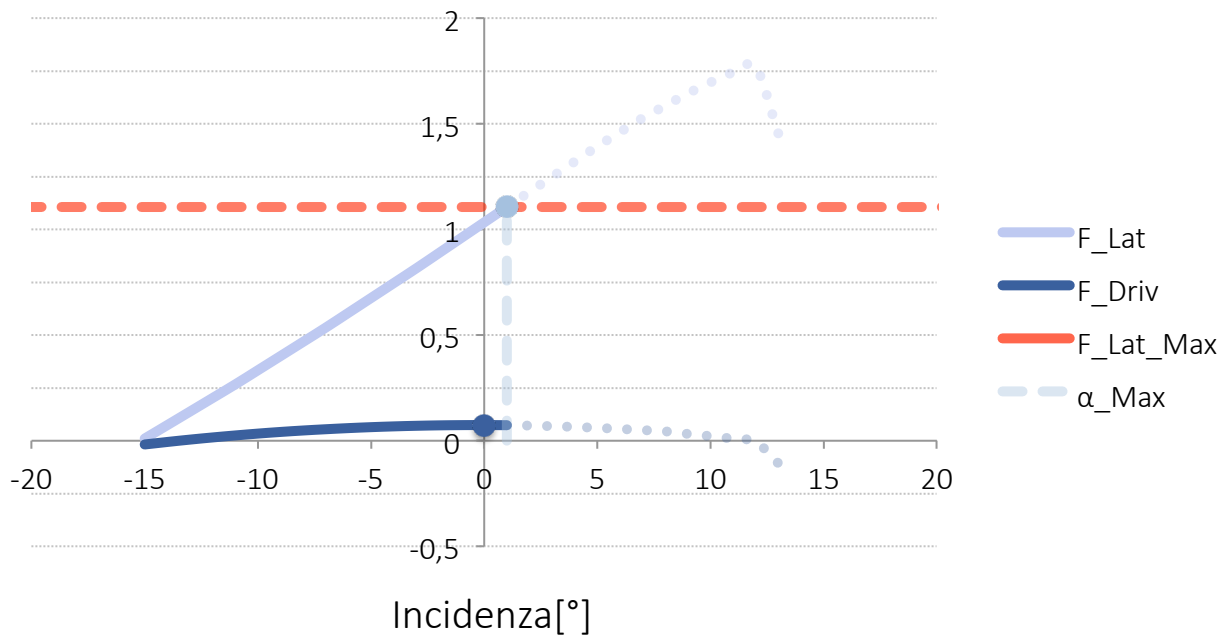


Fig. 7. 8

In questa condizione di navigazione è possibile vedere come la forza laterale sviluppata sia di gran lunga superiore alla *driving force*, al punto da eccedere ampiamente il limite appena imposto all'aumentare dell'incidenza della vela. Esiste quindi un valore massimo dell'angolo di attacco della vela principale oltre il quale non è più possibile equilibrare la barca ed evitare la scuffiata, in questo caso pari a 1° . In questo caso limite, inoltre, la limitazione non è in realtà influente sulle prestazioni, visto che il massimo della spinta si ottiene per un'incidenza vicina a 0° , ma in ogni caso si sta parlando di una situazione difficilmente attuabile nella navigazione visto che la *driving force* potrebbe non essere sufficiente a vincere la resistenza opposta dal mare.

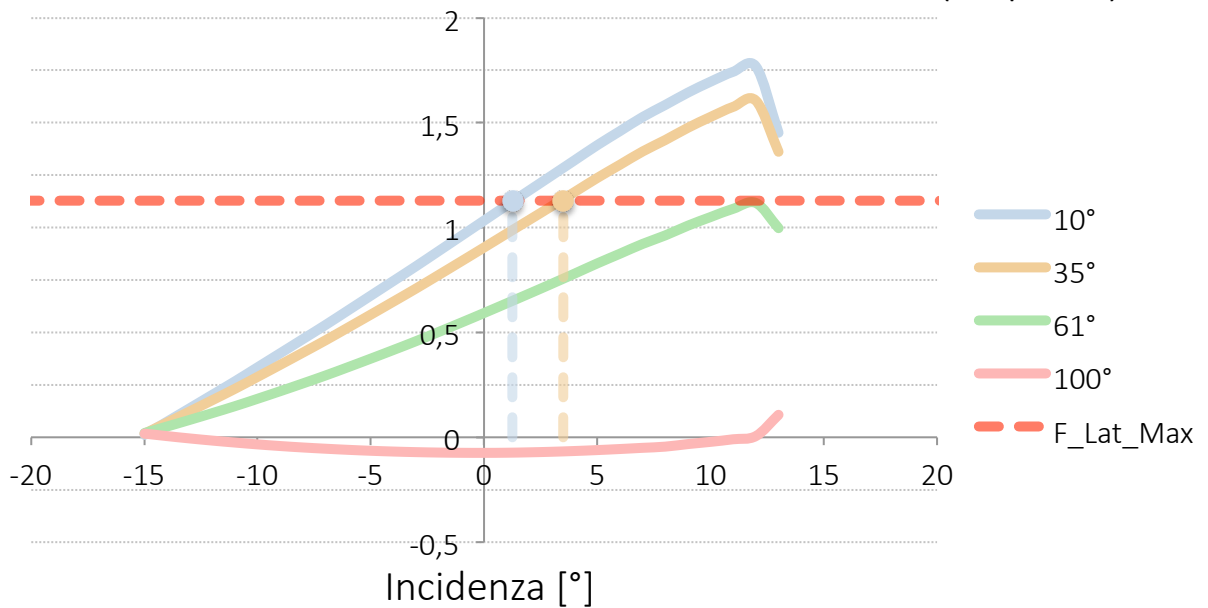
Effetto dell'andatura sulla *Forza Laterale* (Flap 19°)

Fig. 7. 9

Dal grafico della forza laterale con l'incidenza al variare dell'angolo al vento apparente si può vedere come per angoli superiori a 61° la limitazione sulla forza laterale smetta di essere un vincolo attivo, dato che lo sbandamento non raggiunge mai il valore limite. La *driving force* ha invece un andamento opposto, crescente all'aumentare dell'*angolo al vento apparente*.

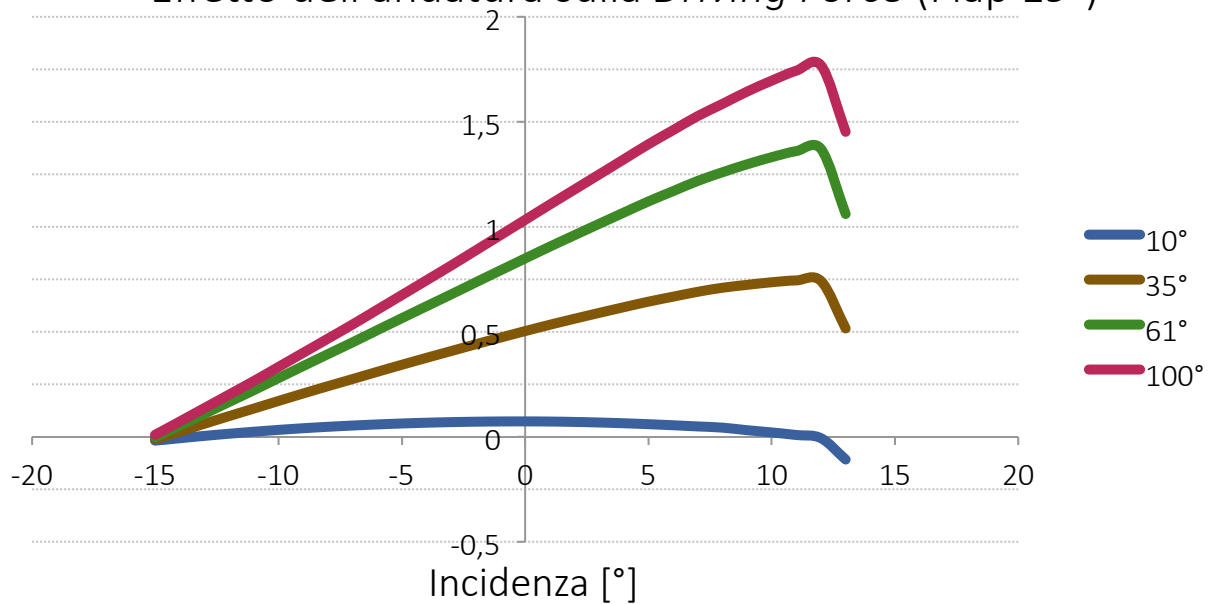
Effetto dell'andatura sulla *Driving Force* (Flap 19°)

Fig. 7. 10

Quello che si intuisce da questi andamenti, quindi, è che fino a un *angolo al vento apparente* di 61° è necessario regolare l'incidenza in base al valore di massimo della *driving force* limitato dall'incidenza massima dovuta al limite di controllo dello sbandamento, mentre sopra questo valore il vincolo non assume più importanza grazie alla riduzione della forza laterale massima e il massimo della spinta si ottiene in corrispondenza dell'incidenza di stallo, che in questo assetto di 19° di deflessione è pari a 12° .

Effetto dell'andatura sulla Spinta Massima (Flap 19°)

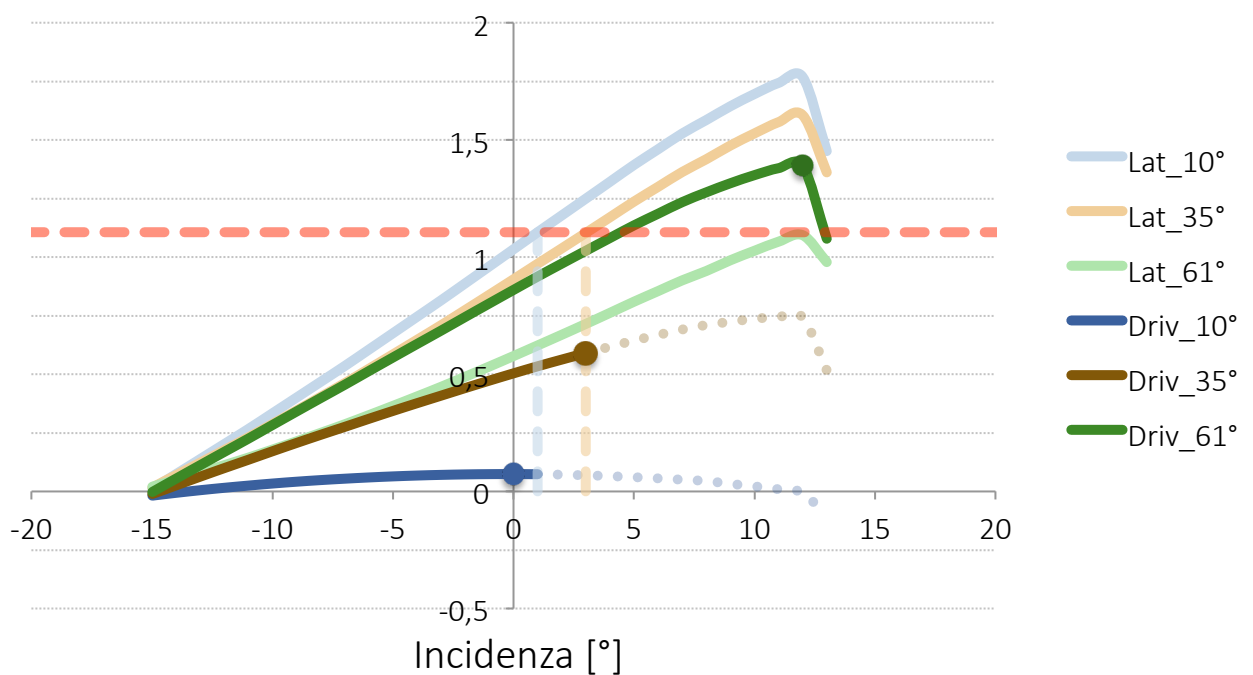


Fig. 7. 11

Come si può osservare, l'incidenza di massima spinta sembra aumentare con l'*angolo al vento apparente*, fino al valore limite dato dall'incidenza di stallo aerodinamico.

Lo scopo della regolazione dell'assetto della velatura mira all'ottenimento della condizione di massima *driving force* ammissibile rispettando i limiti imposti dal rischio di ribaltare la barca. Per ogni valore dell'*angolo al vento apparente* si è visto, quindi, che è possibile definire, a deflessione fissata, un valore di massima spinta ottenibile e un'incidenza di ottimo con cui deve essere regolata la *wingsail*.

Spinta massima e relativa incidenza (flap 19°)

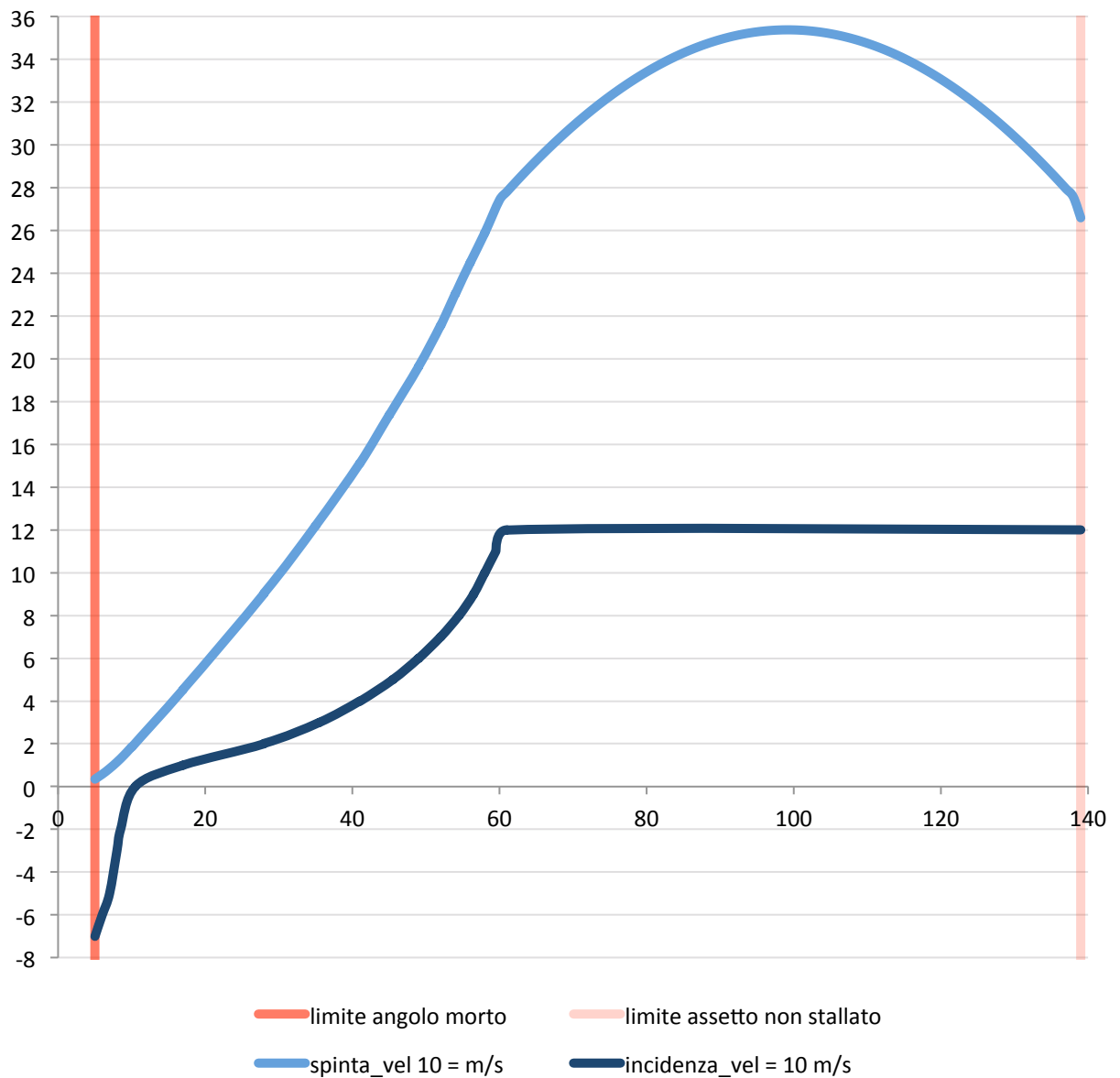


Fig. 7. 12

Sul grafico possono essere osservati un angolo limite inferiore per cui la spinta si annulla e uno limite superiore al di sopra del quale per ottenere il massimo della *driving force* è necessario ricorrere a configurazioni stallate.

In realtà in questo lavoro non è stata considerata la resistenza totale agente sulla barca, per cui è ovvio che il limite inferiore reale sarà necessariamente maggiore, in corrispondenza del valore minimo della spinta che permette il moto della barca.

Effetto della velocità.

Aumentando la velocità diminuisce il valore del coefficiente di forza laterale limite per controllare lo sbandamento, con andamento quadratico. Questo porta, nei casi in cui ciò rappresenta un limite attivo, a una diminuzione dell'incidenza limite e della massima spinta ottenibile.

Effetto della velocità

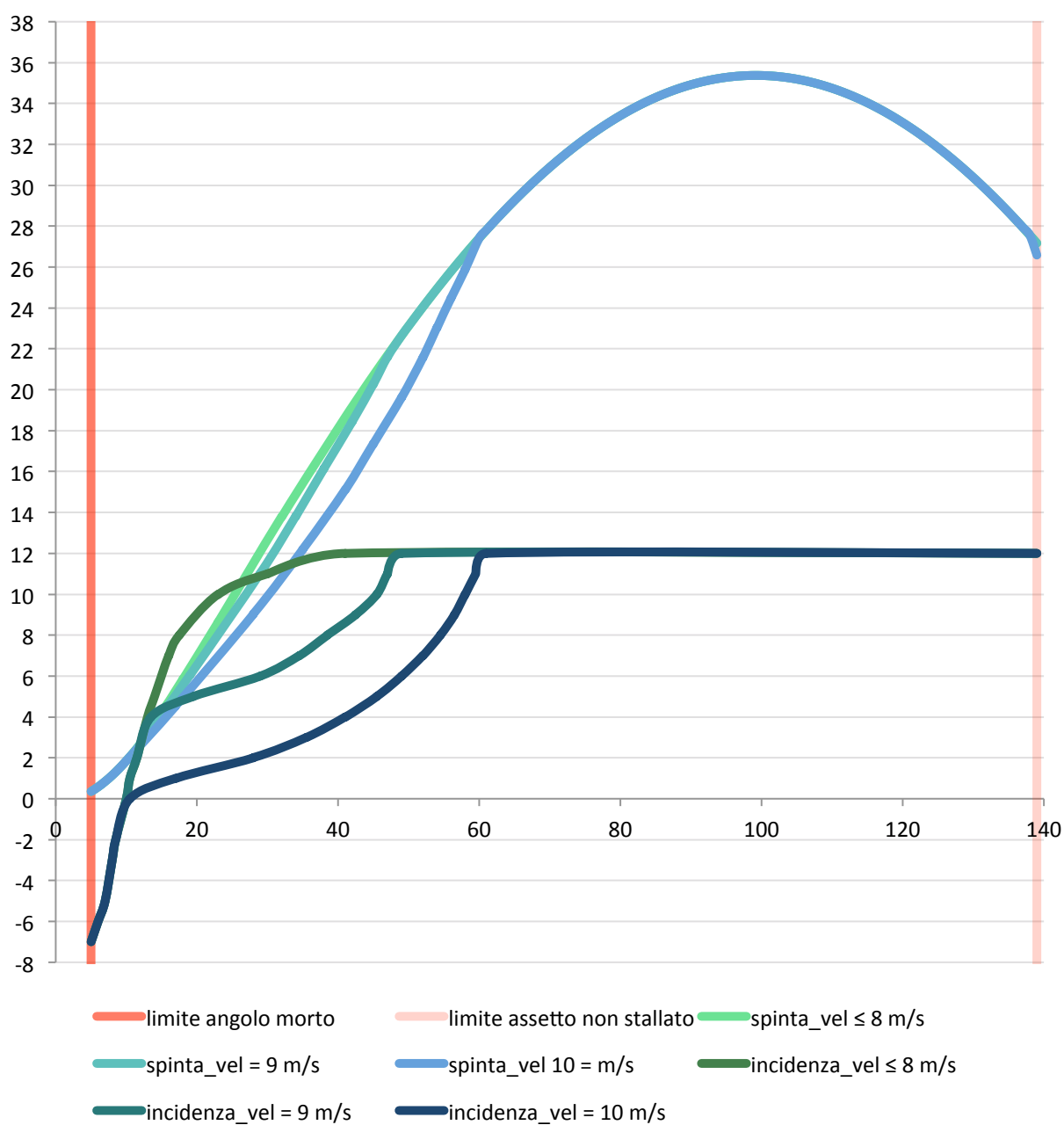


Fig. 7. 13

Come era ragionevole attendersi, una volta superato il minimo valore di *angolo al vento apparente* per cui la forza laterale è in ogni caso inferiore al limite imposto dall'equilibrio in rollio il coefficiente di *driving force* ottenibile sta su una curva che non dipende dalla velocità, mentre si differenzia nel campo di angoli per i quali incide la forza sbandante.

Va precisato che il grafico fa riferimento ai coefficienti di spinta ottenibili mentre l'andamento della *driving force* avrebbe un comportamento esattamente opposto; infatti nella zona in cui il vincolo sul momento di rollio è attivo si lavora di fatto a forza laterale fissata, e quindi anche a spinta fissa, mentre nella zona seguente, in cui i coefficienti non si differenziano con la velocità, si va a differenziare al contrario il valore della forza nella direzione della rotta della barca.

Assetto di ottimo

L'assetto della vela è però definito anche dalla deflessione del *flap*, per cui per poter scegliere la regolazione ottima è necessario tracciare le curve appena viste per diversi valori di questo parametro.

Il risultato è esposto nel grafico seguente, tracciato per una velocità del vento apparente di 10 m/s.

Effetto della deflessione del flap

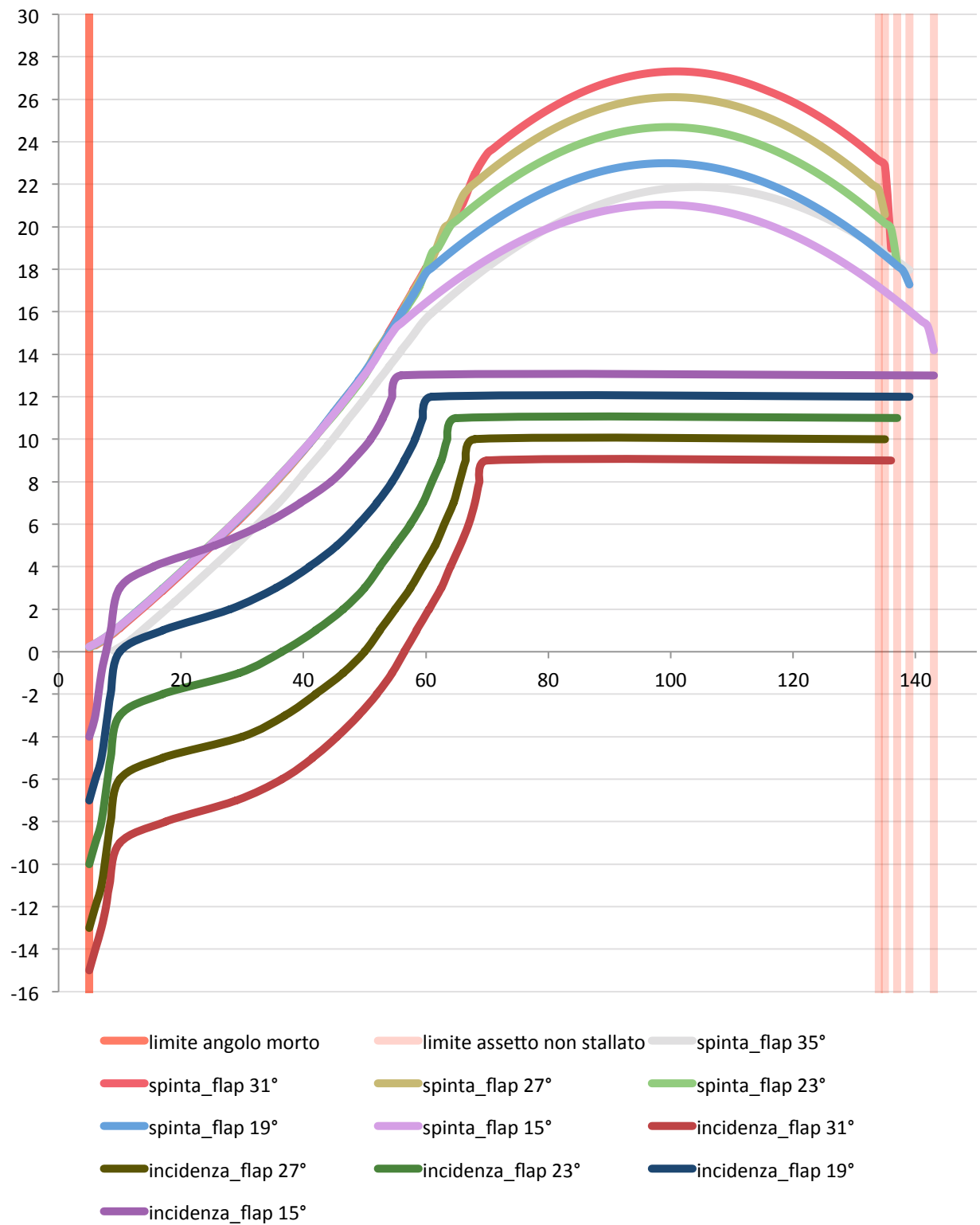


Fig. 7. 14

Nel campo di *angoli al vento apparente* per cui la spinta è limitata dal valore massimo ammissibile della forza laterale la deflessione del *flap* incide solo sul valore di incidenza ad esso associato per raggiungere il valore massimo della *driving force*. Per gli angoli in cui invece il limite è dato dallo stallo della vela, le prestazioni aumentano all'aumentare della deflessione fino a che il flusso sul *flap* riesce a restare attaccato, dopo di che decadono inevitabilmente.

Svergolamento

Nello sviluppo del presente elaborato è stato considerato un profilo di velocità incidente sulla vela costante in apertura. Come si è visto però questo non è in realtà vero nel caso della barca che deve navigare in mare, nel qual caso il vento reale all'interno dello strato limite terrestre con la quota. Questo porta, componendo come mostrato a inizio capitolo la velocità del vento reale con quella della barca, ad avere non solo velocità del vento apparente diverse in apertura, ma anche diversi *angoli al vento apparente*.

Supponendo ad esempio che questi varino in apertura in un *range* di 10° questo significa che la vela, lavorando necessariamente ad angolo di scotta costante in altezza, avrà gli stessi 10° di differenza nell'incidenza dei profili tra base e estremità, che comporterebbe in prima approssimazione la possibilità di ottimizzare entrambe utilizzando una deflessione minore per la sezione a maggiore incidenza e viceversa.

Per una trattazione più esaustiva sarebbe in ogni caso necessario lo studio di configurazioni in cui venga tenuto in conto lo strato limite terrestre e si eseguisse un'ottimizzazione anche con la possibilità di introdurre lo svergolamento del *flap*.

7.3 Utilizzo della vela rigida sensorizzata per la navigazione

L'utilizzo di una vela rigida che possa essere regolata in ogni momento della navigazione in modo da ottimizzare automaticamente il proprio rendimento passa necessariamente dalla creazione di un database attraverso il quale associare ad ogni combinazione di velocità e direzione del vento apparente una condizione di ottimo in termini di distribuzione dei punti di

ristagno su *main* e *flap*, ai quali poi sono direttamente collegati tre valori consigliati di *angolo di scotta*, *deflessione* e *svergolamento*.

Certamente le condizioni nelle quali viene definito questo database dovranno essere il più possibile vicine a quelle di effettivo lavoro della barca a vela, ma difficilmente sarà possibile arrivare ad avere in ogni possibile situazione di navigazione la stessa correlazione tra punti di ristagno e gradi di libertà della vela trovata nelle prove con cui viene tarato il sistema di elaborazione.

Per questo motivo è stato definito una possibile procedura di utilizzo della sensorizzazione per l'ottimizzazione automatica dell'assetto che privilegi il comportamento aerodinamico della vela rispetto alla regolazione meccanica, confidenti del fatto che quest'ultima possa essere sicuramente meno indicativa dei fenomeni fisici che portano allo sviluppo di forze di un certo tipo sulla vela.

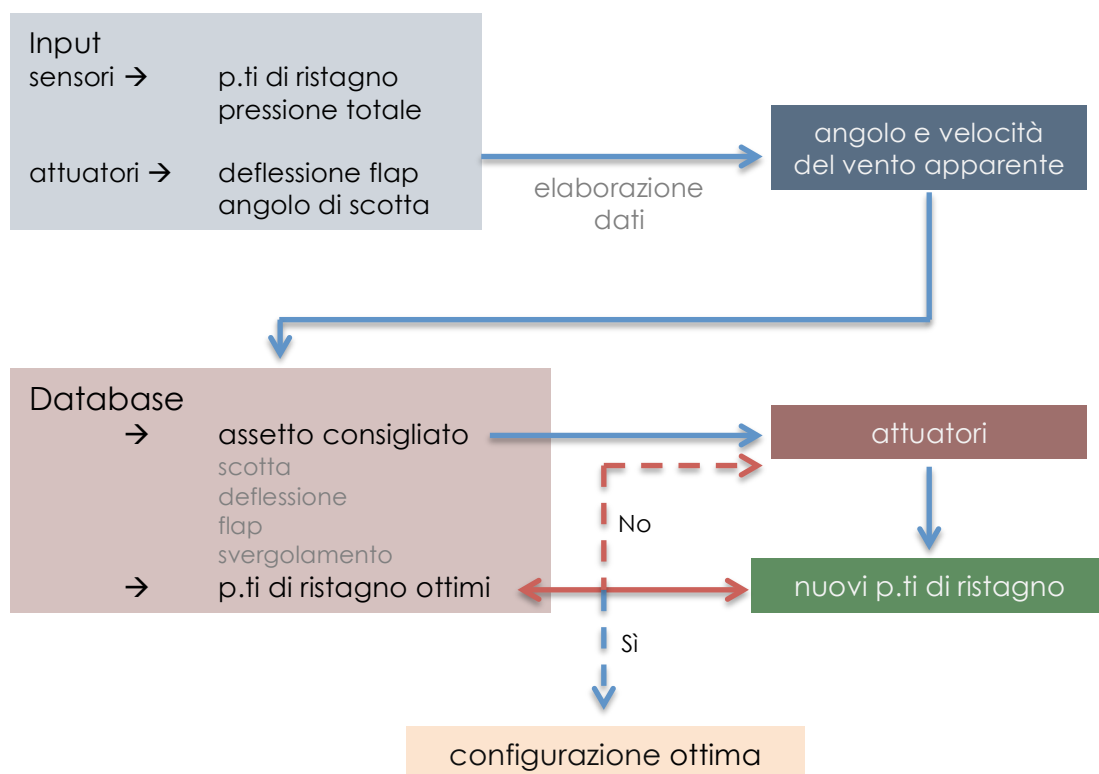


Fig. 7. 15

Certamente questo utilizzo, per quanto possa risultare efficace, richiede un sistema di controllo ed elaborazione di una quantità di dati molto elevata, senza contare il dispendio necessario alla creazione di un database di navigazione completo. Nel caso fosse impossibile

arrivare a questo livello di dettaglio nella selezione dell'ottimo esistono alcune indicazioni che possono essere ottenute dalla sensorizzazione che possono essere d'aiuto nella navigazione:

Per andature disposte piuttosto controvento l'indicazione essenziale riguarda come detto la capacità di garantire l'equilibrio in rollio della barca. Più ci si avvicina al limite della scuffiata e più la *driving force* aumenta, ma con essa anche il rischio di perdere il controllo dell'imbarcazione. In questo caso si è visto che la deflessione del *flap* non incide sulle prestazioni purché si resti entro il limite di funzionamento.

A proposito del limite di funzionamento del *flap* si è visto come invece per andature nelle quali la forza laterale non rappresenti più una restrizione, le massime prestazioni si ottengano deflettendo il *flap* al massimo valore consentito. Come esaminato nel capitolo precedente, attraverso le misure fornite dai sensori disposti sul fianco della vela secondaria è possibile avere un'indicazione della separazione sul *flap* immediata anche senza grosse elaborazioni.

Lo stesso discorso, quando non si abbiano limiti alla forza laterale, vale per la vela principale, dal momento che si è visto come le massime spinte in questa condizione si ottengano in corrispondenza della massima incidenza prima dello stallo del *main*.

Lo svergolamento può essere utilizzato per avere la possibilità di mantenere angoli di scotta elevati senza che i profili più in alto, posti a incidenza maggiore rispetto a quelli inferiori, stallino.

Riassumendo, può essere effettuata una regolazione della vela più grossolana, ma comunque efficace, basandosi solo sui sensori disposti sui fianchi delle vele per misurare la separazione, secondo i seguenti passaggi:

1. Se è critico il limite dato dalla forza sbandante, è necessario equilibrare la barca, e ciò è possibile per qualunque deflessione del flap. Non potendo ricevere informazioni rilevanti dagli strumenti, la barca dev'essere governata al limite della scuffiata in modo esattamente analogo a quanto succede nella navigazione tradizionale. Altrimenti:
2. si regola il flap al limite di utilizzo controllando la separazione su di esso.
3. si regola il *main* al limite di utilizzo controllando la separazione su di esso (può succedere che si rientri nella condizione dominata dal limite della forza sbandante)
4. si agisce su svergolamento e deflessione per aumentare l'inclinazione del *flap* alla base lasciandola invariata in cima.

Certamente, in questo secondo caso non è possibile ottimizzare l'assetto in condizioni di utilizzo della vela stallata, cosa che tramite un database completo potrebbe essere fatta, anche se andrebbe rivista la sensorizzazione o verificato che possa essere utilizzata per ottenere informazioni di qualche tipo in quelle condizioni. Altrimenti mi dovrei fidare dei dati disponibili nei database in termini di regolazione della vela.

Capitolo VIII

Conclusioni

Il lavoro di tesi presentato arricchisce il progetto dell'imbarcazione da regata *Cherubina* attraverso la caratterizzazione completa del flusso aerodinamico generato dalla vela rigida di cui questa è dotata.

Nondimeno, sono stati definiti e descritti una serie di criteri, la cui applicazione consente di dotare una vela rigida di sensori di pressione capaci di fornire le principali informazioni sul comportamento del flusso. Contestualmente, è stata analizzata l'applicazione del metodo di sensorizzazione alla vela di *Cherubina* giungendo, infine, alla definizione dei requisiti che devono possedere i trasduttori di pressione per assolvere allo scopo nel caso particolare. Questo si inserisce come linea guida per una specifica tecnica nel più ampio progetto di innovazione tecnologica in cui l'Università di Pisa, tramite la collaborazione dell'azienda R.i.CO. S.r.l e la sponsorizzazione di Perini Navi S.p.A., mira alla realizzazione di sensori di pressione wireless autoalimentati, che possano essere montati anche sulle *soft sail* consentendo di svolgere in modo automatico il ruolo affidato ai filetti segnamento. Infatti, al livello attuale della tecnica è possibile prendere misure di pressione su una vela rigida tramite l'utilizzo di prese di pressione, ma questo comporta difficoltà logistiche non indifferenti, risultando di fatto impraticabile sulle vele classiche prive di spessore.

Infine, è stato mostrato un esempio dello studio delle prestazioni della vela di *Cherubina*, evidenziando come sia effettivamente possibile definire un processo di regolazione automatica

dell'assetto della vela che porti a trovarsi nella condizione di ottimo in ogni momento della navigazione.

Le naturali prosecuzioni del lavoro svolto in questi mesi possono essere, da un lato, l'applicazione del criterio descritto a un'imbarcazione di *Coppa America* dotata di *wingsail* e, dall'altro, la definizione dello stesso tipo di indicazione nel caso delle *soft sail* di uno *yacht* a vela, per consentire ugualmente la navigazione assistita.